

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-06-2015

# DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN TIEMPO REAL MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

Preparado por:  
Unidad de Puentes



San José, Costa Rica  
Diciembre, 2015



Laboratorio Nacional de  
LanammeUCR Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE

PITRA

Página intencionalmente dejada en blanco



# DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO EN TIEMPO REAL MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES LM-PI-UP-06-2015

Liu-Kuan, Yi-Cheng<sup>1</sup>; Agüero-Barrantes, Pablo<sup>2</sup>; Barrantes-Jiménez, Roy<sup>3</sup>  
y Loria-Salazar, Luis Guillermo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Evaluador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

<sup>2</sup> Ingeniero Evaluador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

<sup>3</sup> Coordinador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

<sup>4</sup> Coordinador general Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) LanammeUCR

**Palabras Clave:** PITRA, Puentes, desplazamiento dinámico, instrumentación, imágenes digitales, monitoreo.

**Resumen:** Un novedoso método para medir, a distancia y en tiempo real, el desplazamiento dinámico de un punto en un plano dado, se desarrolló y se implementó mediante un sistema compuesto por una cámara digital programable, lentes teleobjetivos, estructura de soporte y una computadora portátil. El algoritmo diseñado así como la capacidad de la cámara digital permiten una tasa de muestreo variable desde mediciones estáticas hasta unos 100 Hz, satisfaciendo las necesidades de medición tanto en laboratorio como en campo.

El sistema y el algoritmo propuestos fueron validados tanto en laboratorio como en campo. Las pruebas de laboratorio fueron realizadas con la ayuda de una mesa vibratoria pequeña comparando las historias de desplazamiento de un sistema de un grado de libertad medidas por un sistema de medición de láser y por la cámara, y con especial atención en la influencia del ángulo de visión de la cámara al punto blanco. Por otro lado, los factores como la luz ambiental, la distorsión de la imagen a larga distancia por la aberración óptica, así como las imprecisiones causadas por las vibraciones del equipo debido al viento son tomadas en cuenta en las pruebas en campo. Al final, el sistema fue utilizado tanto en la medición de desplazamientos dinámicos en algunos puentes bajo la acción de cargas operacionales, así como en una prueba de carga estática, donde las propiedades de la deflexión dinámica así como las frecuencias naturales de oscilación del puente pueden llegar a conocerse con el presente método.

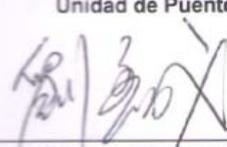
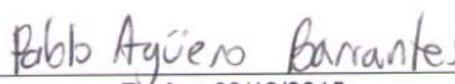
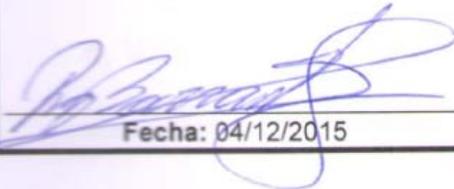
---

## Referencias

- Lee. J. J., Cho. S., Shinozuka. M., Yun. C.B., Lee. C.G., Lee. W.T. (2006) "Evaluation of Bridge Load Carrying Capacity Based on Dynamic Displacement Measurement Using Real-time Image Processing Techniques". Steel Structures 6 p. 377-385.
- Lee. J.J., Shinozuka. M. (2006) "Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques". Experimental Mechanics (2006) 46: p. 105-114.
- Bell. E.S., Brogan. P., Lefebvre. P., Peddle. J., Brenner. B., Sanayei. M. (2011) "Digital Imaging for Bridge Deflection Measurement of a Steel Girder 1 Composite Bridge". Transportation Research Board 2011 Annual Meeting, paper 11-1633.
- Schreier. H., Orteu. J.J., Sutton. M.A. (2009) "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications." Springer (2009).
- Mitani. K., Matsumoto. M. (2012) "Innovative Bridge Assessment Methods Using Image Processing and Infrared Thermography Technology." 37th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES (Aug, 2012), Singapore.



Lui-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema de medición de desplazamiento en tiempo real mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales LM-PI-UP-06-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

|  |  |  |
|--|--|--|
| <b>1. Informe:</b> LM-PI-UP-06-2015  |  | <b>2. Copia No.</b><br>1                               |
| <b>3. Título y subtítulo:</b><br>DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN TIEMPO REAL MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES  |  | <b>4. Fecha del Informe</b><br>14 de diciembre de 2015 |
| <b>5. Organización y dirección</b><br>Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales<br>Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,<br>San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica<br>Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440  |  |  |
| <b>6. Notas complementarias</b><br>Ninguna   |  |  |
| <b>7. Resumen</b><br><i>Un novedoso método para medir, a distancia y en tiempo real, el desplazamiento dinámico de un punto en un plano dado, se desarrolló y se implementó mediante un sistema compuesto por una cámara digital programable, lentes teleobjetivos, estructura de soporte y una computadora portátil. El algoritmo diseñado así como la capacidad de la cámara digital permiten una tasa de muestreo variable desde mediciones estáticas hasta unos 100 Hz, satisfaciendo las necesidades de medición tanto en laboratorio como en campo. El sistema y el algoritmo propuestos fueron validados tanto en laboratorio como en campo. Las pruebas de laboratorio fueron realizadas con la ayuda de una mesa vibratoria pequeña comparando las historias de desplazamiento de un sistema de un grado de libertad medidas por un sistema de medición de láser y por la cámara, y con especial atención en la influencia del ángulo de visión de la cámara al punto blanco. Por otro lado, los factores como la luz ambiental, la distorsión de la imagen a larga distancia por la aberración óptica, así como las imprecisiones causadas por las vibraciones del equipo debido al viento son tomadas en cuenta en las pruebas en campo. Al final, el sistema fue utilizado tanto en la medición de desplazamientos dinámicos en algunos puentes bajo la acción de cargas operacionales, así como en una prueba de carga estática, donde las propiedades de la deflexión dinámica así como las frecuencias naturales de oscilación del puente pueden llegar a conocerse con el presente método.</i> |  |  |
| <b>8. Palabras clave</b><br>Puentes, desplazamiento dinámico, instrumentación, imágenes digitales, monitoreo.  | <b>9. Nivel de seguridad:</b><br>Ninguno   | <b>10. Núm. de páginas</b><br>121                      |
| <b>11. Informe por:</b><br>Ing. Yi Cheng Liu Kuan<br>Unidad de Puentes<br><br>Fecha: 27/11/2015   | <b>12. Revisado por:</b><br>Ing. Pablo Agüero Barrantes<br>Unidad de Puentes<br><br>Fecha: 02/12/2015                      |  |
| <b>13. Revisado por:</b><br>Ing. Roy Barrantes Jiménez<br>Coordinador Unidad de Puentes<br><br>Fecha: 04/12/2015  | <b>14. Revisado por:</b><br>Ing. Luis Guillermo Loria Salazar, Ph.D.<br>Coordinador General PITRA<br><br>Fecha: 14/12/2015 |  |



## TABLA DE CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>9</b>  |
| 1.1 NECESIDAD DE NUEVAS TÉCNICAS EN LA MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE CARGAS EN PUENTES Y ENSAYOS DE LABORATORIO ..... | 10        |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN.....  | 13        |
| 1.3 OBJETIVOS .....   | 14        |
| 1.4 REVISIÓN DE LITERATURA REFERENTE A LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES EN LAS MEDICIONES.....                        | 15        |
| <b>2. DESARROLLO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN TIEMPO REAL MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES.....</b>          | <b>17</b> |
| 2.1 SELECCIÓN DE LA CÁMARA DE VIDEO DIGITAL .....   | 17        |
| 2.2 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN .....   | 24        |
| 2.3 DISEÑO DEL PROGRAMA DE COMPUTACIÓN PARA EL CONTROL DE LA CÁMARA Y ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES .....                         | 29        |
| 2.3.1 GRÁFICO DE INTERFAZ DE USUARIO .....  | 29        |
| 2.3.2 METODOLOGÍA PARA LA ESPECIFICACIÓN DE SISTEMA DE COORDENADAS Y EL CÁLCULO DE LA ESCALA (MM/PIXEL) .....   | 31        |
| 2.3.3 ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES PARA EL RASTREO DEL BLANCO EN TIEMPO REAL.....   | 34        |
| <b>3. VALIDACIÓN EN LABORATORIO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....</b>  | <b>47</b> |
| 3.1 CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS PARA LAS PRUEBAS DE VALIDACIÓN .....   | 48        |
| 3.2 VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE MEDICIÓN EN TIEMPO REAL Y LA EFICACIA DEL ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES.....                       | 51        |
| 3.3 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UNA ALINEACIÓN SESGADA DE LA CÁMARA RESPECTO AL PLANO DE MEDICIÓN.....  | 56        |
| 3.3.1 RESULTADOS PARA EL ÁNGULO DE SESGO VERTICAL DE 12.9°.....   | 58        |
| 3.3.2 RESULTADOS PARA EL ÁNGULO DE SESGO VERTICAL DE 30.16°.....  | 59        |
| 3.3.3 RESULTADOS PARA EL ÁNGULO DE SESGO HORIZONTAL DE 23.07°.....  | 61        |
| 3.3.4 RESULTADOS PARA EL ÁNGULO DE SESGO HORIZONTAL DE 34.56°.....  | 63        |
| 3.3.5 RESULTADOS PARA EL ÁNGULO DE SESGO HORIZONTAL DE 43.55°.....  | 64        |
| <b>4. VALIDACIÓN EN CAMPO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....</b>  | <b>67</b> |

|   |            |
|---|------------|
| 4.1 VALIDACIÓN EN CAMPO MEDIANTE EL USO DE LA MESA VIBRATORIA.....  | 68         |
| 4.1.1 PRUEBA CON DESPLAZAMIENTOS ALEATORIOS GENERADOS VÍA MANUAL .....  | 74         |
| 4.1.2 PRUEBA CON SINUSOIDALES .....   | 75         |
| 4.1.3 PRUEBA CON EL SISMO DE KOBE.....  | 76         |
| 4.1.4 PRUEBA CON EL SISMO DE NORTHRIDGE .....   | 77         |
| 4.2 VALIDACIÓN EN CAMPO MEDIANTE EL PUENTE PEATONAL SOBRE LA QUEBRADA LOS<br>NEGRITOS DENTRO DEL CAMPUS DE LA UCR ..... | 80         |
| <b>5. APLICACIÓN DEL SISTEMA EN MONITOREO DE PUENTES .....</b>  | <b>87</b>  |
| 5.1 MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO PSEUDO-ESTÁTICO DE UN MURO DE MAMPOSTERÍA EN UNA<br>PRUEBA A ESCALA NATURAL .....       | 87         |
| 5.2 MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO<br>VIRILLA, RUTA NO. 1 .....          | 89         |
| 5.2.1 MEDICIÓN EN EL PUNTO 1 .....  | 91         |
| 5.2.2 MEDICIÓN EN EL PUNTO 2 .....  | 96         |
| 5.2.3 MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO EN EL CENTRO DE CLARO DEL TRAMO 4.....   | 99         |
| 5.3 MEDICIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DINÁMICO DEL PUENTE SOBRE EL RÍO GUACIMAL, RUTA N°<br>1.....                            | 104        |
| 5.4 PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA EFECTUADA EN EL PUENTE SOBRE EL RÍO SECO, RUTA N°1. ....                                   | 108        |
| <b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>  | <b>116</b> |
| 6.1 CONCLUSIONES.....   | 116        |
| 6.2 RECOMENDACIONES .....   | 117        |
| <b>REFERENCIAS .....</b>  | <b>118</b> |

## 1. INTRODUCCIÓN

La medición constituye uno de los pilares fundamentales de la ciencia, y se puede definir como la cuantificación numérica de observaciones experimentales que, mediante métodos de análisis numérico permite validar teorías o modelos matemático-analíticos contra la realidad experimental. Además permite lograr un entendimiento cuantitativo del fenómeno en observación,

En ingeniería civil y especialmente en el área de estructuras, el conocimiento de los cambios o movimientos producidos en un sistema estructural ante la acción de cargas o excitaciones externas tales como el desplazamiento, velocidad, aceleración, deformación unitaria, rotación, etc., son esenciales para poder monitorear y evaluar el desempeño y del estado real del sistema estructural. Las mediciones o “detecciones” de tales movimientos y cambios en el sistema estructural sólo se puede lograr mediante la interpretación de las señales que generan diferentes tipos de sensores tales como los acelerómetros que miden la aceleración en un punto, los transductores de desplazamientos LVDT's (acrónimo de Linear Variable Displacement Transducer o transductor de desplazamiento variable lineal) que miden desplazamientos relativos entre dos puntos, inclinómetros (en inglés Tiltmeters) que miden la rotación respecto a la línea de gravedad en un punto, las galgas extensométricas (en inglés Strain Gauges) que miden la deformación unitaria en un punto, y otros. Estos sensores mencionados anteriormente son denominados sensores de contacto, es decir, necesitan estar en contacto con la estructura para poder obtener mediciones. No obstante, dada la gran complejidad y envergadura de las estructuras civiles, no todos los puntos de la estructura son fácilmente accesibles o permiten hacer mediciones debido a limitaciones de espacio. Este hecho junto con la necesidad de realizar evaluaciones rápidas y monitoreo permanente de estructuras civiles, ha llevado al surgimiento de nuevas alternativas de medición o detección, y a la creación de sensores cada día más potentes y novedosos.

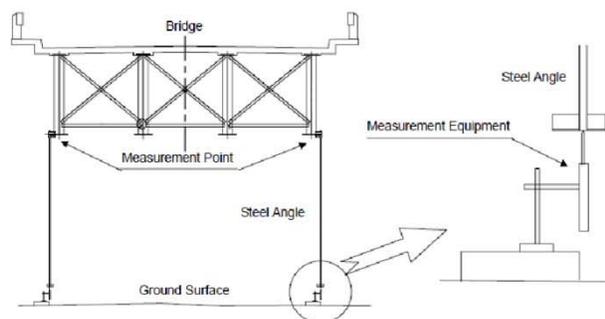
## 1.1 Necesidad de nuevas técnicas en la medición de desplazamientos para la realización de pruebas de cargas en puentes y ensayos de laboratorio

Los puentes son elementos claves para el funcionamiento apropiado de un sistema de carreteras. Muchos de los puentes en Costa Rica fueron diseñados y construidos hace varias décadas cuando las cargas de diseño eran menores a las cargas utilizadas actualmente. Lo anterior sumado al hecho del deterioro que sufre el puente con el paso de tiempo, hace necesaria y urgente la implementación de metodologías prácticas y eficientes que permiten evaluar la capacidad de carga real de los puentes.

Las pruebas de cargas son esenciales para realizar una evaluación cuantitativa del estado estructural de un puente y la determinación de su capacidad de carga. Lineamientos y recomendaciones para las mismas se puede encontrar en el Manual para la Evaluación de Puentes de la Asociación Americana de Oficiales de carreteras estatales y transporte” (AASHTO por sus siglas en inglés) [ref. 2]. Para la ejecución de pruebas de carga, se necesita medir experimentalmente las respuestas de la estructura ante la acción de cargas estáticas o dinámicas y uno de los parámetros indispensables para determinar la capacidad de carga de la superestructura es la deformación vertical en uno o varios puntos del puente.

Tradicionalmente los datos de la deformación en un puente se obtienen instalando sensores eléctricos o mecánicos como LVDT’s o extensómetros, y midiendo el desplazamiento de uno o varios puntos del puente contra una referencia fija, la cual comúnmente se obtiene anclando una estructura rígida tal como una columna o un tubo metálico que se extiende desde la referencia fija (puede ser el lecho rocoso del río o suelo firme) hasta la superestructura del puente, o de este último hasta la referencia fija para medir el movimiento relativo entre ellas, tal como se puede observar en la Figura 1 [ref. 1] (Japan International Cooperation Agency, 2007), donde muestra la configuración de la prueba de carga que se hizo en el puente sobre el río Chirripó, en Costa Rica. No obstante, para los puentes ubicados sobre cañones profundos o si el cauce del río es profundo, la medición en forma tradicional sería totalmente inviable. Además, el anclaje de estas extensiones de la

referencia fija demanda exceso de esfuerzo, implica riesgos en el trabajo e imposibilita la ejecución de pruebas de carga de forma eficiente. Por ende, soluciones alternativas y eficientes deben desarrollarse para hacer posible la evaluación rápida de estructuras de puentes.



**Figura 1.** Prueba de carga realizada en el puente sobre Río Chirripó.  
 (tomado de ref.1)Fuente: Japan International Cooperation Agency, 2007.

Los sensores de detección remota toman cada día más importancia en el monitoreo y evaluación de estructuras civiles. Se puede encontrar investigaciones a nivel internacional relacionadas con pruebas y aplicaciones de sensores de detección remota en la evaluación de estructuras de puentes tales como, el monitoreo de desplazamientos en los puentes Tsing-Ma de Hong Kong y el puente Humen ubicado en Guangdong, China, mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (Jjiang et al., 2002) [ref.3]; la obtención de la deformación ante cargas dinámicas y estáticas en un punto del puente Indiano y también un puente de ferrocarril sobre el río Arno, ambos ubicados en Italia, mediante Radares Interferométricos, los cuales se tratan de sistemas de captación de imágenes digitales por el sistema de estudio interferométrico (Image by Interferometric Survey System, IBIS-S por sus siglas en inglés) y fueron creados con la capacidad de monitorear movimientos dinámicos de múltiples puntos en forma simultánea (Massimiliano Pieraccini, 2007) [ref. 4]; la obtención de la fuerza de tensión los cables atirantados del puente Tataru, ubicado en Japón, por medio de mediciones con vibrómetros láser Doppler, el cual ha sido empleado también para el

análisis modal de estructuras civiles (Takeshi Miyashita & Masatsugu Nagai, 2008) [ref. 5]; la obtención de la deflexión ante cargas dinámicas y estáticas en diferentes puntos del puente Tai-Ya, ubicado en Taiwán, aplicando el denominado Detector de Posición Sensitiva (Position Sensitive Detector, PSD por sus siglas en inglés) (Sung et al., 2012) [ref. 6]; y por lo último, se puede encontrar métodos de detección óptico mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales que se realizan por medio de cámaras digitales.

Con respecto a las técnicas anteriormente mencionadas, exceptuando las técnicas de procesamiento de imágenes digitales, son dispositivos industriales altamente especializados relativamente fáciles de usar, pero también con costos relativamente elevados, y se debe respetar sus alcances y limitaciones (Unidad de puentes, 2013) [ref. 7]. En cuanto al ámbito de aplicación del método de detección óptico mediante procesamiento de imágenes digitales es sumamente amplio, y existe una gran diversidad de accesorios y productos tales como lentes de diferentes alcances y cámaras de variadas especificaciones para diferentes propósitos; son relativamente accesibles con respecto a otros sensores y presentan la versatilidad de permitirle al usuario la libertad de personalizar los algoritmos de procesamiento y la escogencia de cámaras y lentes para diferentes propósitos, factores que lo hace atractivo y objeto de investigación a nivel internacional.

Además de las pruebas de carga en puentes las técnicas de medición remota también se utilizan en ensayos de laboratorio con la misma necesidad como en las pruebas sobre mesas vibratorias y ensayos de estructuras sometidas a cargas cíclicas, especialmente en aquellos ensayos donde se pretende llevar la estructura a la falla donde se presenta riesgos de dañar los instrumentos de medición de contacto, o que el desplazamiento final del ensayo quede fuera del rango de operación del instrumento y se perderían datos importantes. En tales casos las técnicas de medición remota podrían ofrecer soluciones atractivas.

## 1.2 Justificación

- Costa Rica es un país sujeto a múltiples amenazas naturales. La infraestructura vial constituye la línea de vida para responder ante emergencias que se generan durante eventos extremos, por lo tanto, esta debe ser inspeccionada, mantenida y monitoreada para asegurar de su buen estado de funcionamiento.
- Los puentes como elemento clave de la infraestructura vial, están sujetos a deterioro con el paso del tiempo, por lo que la evaluación de su capacidad de carga es indispensable para la regulación del peso de vehículos que transitan sobre ellos, y servirán también de base para el planeamiento y diseño de la rehabilitación de los mismos.
- Las labores de inspección visual en puentes que ha estado realizando el LanammeUCR deben ser complementadas con las pruebas de carga estática y dinámica para estimar la capacidad de carga real del puente y el nivel de desempeño que se encuentra ante las cargas de hoy día, los cuales serían insumos importantes para la toma de decisiones en materia de administración de puentes.
- Los métodos o transductores tradicionales son sumamente difíciles de utilizar en las pruebas de carga debido a la condición de campo, tales como las grandes profundidades en los cañones, por lo que un novedoso método para medir, a distancia y en tiempo real, el desplazamiento de un punto dado, en la estructura de puentes debe ser creado y validado para su aplicación en campo.
- El método de medición de desplazamiento de un punto, a distancia y en tiempo real, también puede ser implementado en las investigaciones en ingeniería estructural y de puentes, y en las pruebas de laboratorio.

## 1.3 Objetivos

### Objetivo general

Desarrollar un sistema de medición, a distancia y en tiempo real, del desplazamiento de un punto dado en una estructura en general, mediante métodos ópticos y técnicas de procesamiento de imágenes digitales, que puede ser implementado en el monitoreo, pruebas dinámicas y estáticas de los puentes de Costa Rica, y validarlo mediante pruebas de laboratorio y en campo.

### Objetivos específicos

- Revisar la literatura técnica a nivel nacional e internacional sobre los diferentes conceptos, equipos y sistemas de medición a distancia así como posibles aplicaciones en estructuras de puentes.
- Conceptualizar el sistema de medición a distancia basada en imágenes; seleccionar y adquirir los componentes tecnológicos del sistema de visión que se adaptan a la realidad y los tipos de puentes existentes en Costa Rica así como las necesidades y metas de monitoreo y evaluación.
- Conceptualizar, diseñar y programar los algoritmos para el sistema de medición a distancia y en tiempo real, y realizar prueba para el afinamiento, modificación de algoritmos y corrección de errores.
- Realizar pruebas de validación en laboratorio con énfasis en la validación de la eficacia del algoritmo de procesamiento de imágenes digitales y su cumplimiento con los requerimientos de tiempo real; además, estudiar la influencia de los sesgos en la alineación de la cámara respecto al plano de medición.
- Realizar pruebas de validación en campo con énfasis en la estabilidad y vibración del equipo, influencia de la luz ambiental, el nivel de ruido y la calidad de los datos obtenidos.

- Utilizar el presente sistema de medición en la obtención de desplazamientos dinámicos de un punto ubicado en el centro del claro de algunos puentes bajo la acción de cargas operacionales. Se busca demostrar la eficacia del sistema implementándolo para algunos puentes de Costa Rica donde es imposible la aplicación de métodos tradicionales.

#### **1.4 Revisión de literatura referente a la aplicación de técnicas de procesamiento de imágenes digitales en las mediciones.**

El uso de imágenes para propósitos de medición no es algo nuevo. Desde aplicaciones de fotografías para fines cartográficos en siglo XVIII, conocemos actualmente como fotogrametría, hasta las imágenes satelitales de hoy día, son aplicaciones de imágenes en la medición. En el ámbito de ingeniería, se puede encontrar aplicaciones de procesamiento de imágenes digitales para la medición de campo de deformación en superficies planas (Chu et al., 1985; Clocksin et al., 2002; Hubert Schreier, Jean-José Orteu y Michael A. Sutton, 2009) [refs. 11,12,13], medición de desplazamientos de uno o varios puntos, y en dos y tres dimensiones (Xiaojuan Qi, 2013; Haemin Jeon, Yousuk Bang, and Hyun Myung, 2011) [refs. 18,19], detección, análisis y monitoreo de grietas (Yamaguchi et al., 2008; Jeffrey D. Helm, 2008; Koji Mitani y Masato Matsumoto, 2012) [refs. 14,15,16] y también específicamente en la medición de deflexión de uno o varios puntos del puente ante cargas estáticas y dinámicas (J.J. Lee & M. Shinozuka, 2006; Lee *et al.*, 2006; Santini-Bell et al., 2011; Michel et al., 2011) [refs. 8,9,10,17].

Para hacer posible el monitoreo de la deformación de un punto del puente, se necesita de una cámara digital con buena resolución así como un lente teleobjetivo de gran longitud focal que permita acercarse lo suficiente al blanco de medición para obtener un nivel de precisión sub-milimétrica. Refiriéndose específicamente a la investigación realizada por J.J. Lee & M. Shinozuka, 2006 [ref. 9], los autores emplearon una cámara de video digital comercial de 30x

de capacidad en acercamiento (zoom), con una resolución de 720 x 480 pixeles y una tasa de muestreo de 30 cuadros por segundo; además se le añadió una lente telescópica con 8x de capacidad en acercamiento para mejorar la visión del blanco de rastreo, el cual consiste en cuatro puntos blancos sobre una pantalla negra. La cámara es conectada mediante el puerto IEEE1934 a una computadora portátil, y el trabajo de adquisición y procesamiento en tiempo real fue realizado por el programa MATLAB 7.0. La metodología propuesta por estos autores fue validada exitosamente tanto en laboratorio como en pruebas de carga en puentes.

Otro trabajo similar al anterior pero con una perspectiva diferente fue realizado por la Universidad de Antioquia de Colombia (Michel et al., 2011) [ref. 17], donde se instalaron uno o varios punteros láser sobre la estructura para la medición de uno o varios puntos; en una pantalla blanca se proyectan los rayos láser de los punteros y mediante una cámara de video digital comercial se registran los movimientos de los puntos proyectados en la pantalla. En el trabajo de validación en laboratorio y en campo se utilizó una simple cámara web de 320 x 240 pixeles de resolución, con una tasa de muestreo de 30 Hz. En laboratorio se utilizó un puntero láser con poder de salida de 3mW (un puntero común y corriente), mientras que en campo se tuvo que utilizar un equipo telescópico en el sistema láser para evitar divergencia del haz debido a la larga distancia entre el puntero y la pantalla.

Dadas estas experiencias innovadoras y exitosas a nivel internacional sobre la aplicación de procesamiento de imágenes digitales en la medición de deflexiones mediante equipos comerciales, se busca desarrollar en el presente trabajo de investigación, un sistema versátil y robusto que permita medir y monitorear las deformaciones en los puentes de Costa Rica, partiendo desde la selección de equipos idóneos, diseño del programa de computación para el control de la cámara y algoritmos de procesamiento de imágenes digitales, junto con la validación experimental en laboratorio y en campo de los anteriores, con el objetivo último de aplicarlo en el monitoreo y evaluación de puentes.

## 2. DESARROLLO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN TIEMPO REAL MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES

### 2.1 Selección de la cámara de video digital

Para hacer realidad la medición de desplazamientos de un punto en tiempo real, además de la necesidad de un algoritmo de cómputo eficiente en el rastreo del blanco de medición, se requiere de una cámara de video digital que puede ser controlada por programas de computación en tiempo real. Dada la experiencia exitosa que tuvieron J.J. Lee & M. Shinozuka, 2006, [ref. 9] se adquirió una cámara digital que pueda ser controlada por MATLAB, el cual es un lenguaje de programación de alto nivel, mediante la “caja de herramientas de adquisición de imágenes” (Image Acquisition Toolbox), de modo que la transmisión en tiempo real de las imágenes a la computadora sea controlable para su procesamiento inmediato. Por otro lado, lentes con diferentes distancias focales y capacidades de acercamientos son también indispensables para hacer funcionar el sistema de visión ante diferentes distancias de medición.

A diferencia de las investigaciones anteriores quienes utilizaron cámaras digitales comerciales en sus trabajos, y después de una revisión exhaustiva de información técnica y búsqueda de productos disponibles en numerosos proveedores, se concluyó que la cámara digital que se adecúa mejor a los requerimientos descritos, es una cámara industrial destinada para el área denominado como “visión de máquina”, utilizada en la robótica y en sistemas de vigilancia de procesos industriales, pues, estas cámaras poseen las características y la versatilidad de poder ser programadas y controladas desde una unidad de procesamiento (CPU) o un controlador en tiempo real.

Una cámara digital, a diferencia de la noción comercial que se ha adquirido popularmente, es de hecho un sensor. El núcleo de las cámaras digitales es el sensor de luz conocido como el sensor fotoeléctrico, compuesto por grandes cantidades de fotodiodos que captan la luz y la

convierten en una corriente eléctrica en función de la intensidad luminosa. Cada pixel de la imagen digital corresponde a un fotodiodo, de modo que si la especificación de una cámara digital dice tener 4 millones de pixeles, significa que el sensor fotoeléctrica posee 4 millones de fotodiodos. Por ejemplo, si las imágenes que capta una cámara digital tiene una resolución de 1,280 x 960 pixeles, esto quiere decir que los fotodiodos componen una matriz de 1,280 puntos de ancho por 960 puntos de alto, que en total suma 1,228,800 puntos. Al igual que en fotografía, a mayor resolución mayor es la calidad de imagen.

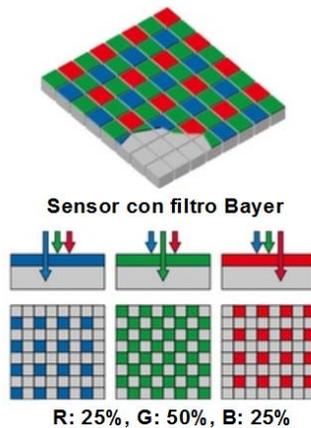
Existen dos tipos de sensores de fotoeléctricos en las cámaras digitales: el primero son los Dispositivos de carga acoplada, conocidos como CCD por sus siglas en inglés de “Charge-Coupled Device”, y el segundo, semiconductor complementario de óxido metálico, conocido como CMOS por sus siglas en inglés de “Complementary Metal-Oxide-Semiconductor”. En apariencia no es fácil distinguir uno de otro ya que los dos se asemejan a un chip, la mayor diferencia consiste en que para un CCD, al final del tiempo de exposición a la luz, las cargas eléctricas generadas en los fotodiodos son transferidas a una serie de registros verticales y luego horizontales de electrones, y al final la señal recolectada es amplificada y convertida en digital por un convertidor de señal análogo a digital; mientras que cada fotodiodo de un CMOS está conectado a un amplificador respectivamente, por lo que la señal analógica es amplificada individualmente y transferida mediante un bus para al finalmente ser convertido en una señal digital. Esta diferencia en la estructura de la tecnología genera las siguientes ventajas y desventajas para cada tipo de sensor que se resumen en la Tabla 1.

Aunque tradicionalmente el desempeño de los sensores CMOS es menor que CCD, debido al avance y renovación tecnológica en la producción de sensores CMOS, las desventajas que tiene en cuando a sensibilidad y ruido han sido mejorados hasta el grado que la diferencia de estos con sensores CCD ya no es visible al ojo humano. Además, la tecnología de la industria de transistores ha permitido la fabricación de sensores CMOS de gran tamaño (gran resolución) a bajo costo, lo cual ha popularizado su uso en una amplia gama de cámaras comerciales.

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas de sensores CCD y CMOS

|   | CCD  | CMOS  |
|---|--|---|
| Sensibilidad a la luz y el rango dinámico | Mayor (apertura fotosensible es mayor)   | Menor (apertura fotosensible es menor debido al congestionamiento de dispositivos de amplificación en cada pixel) |
| Razón ruido/señal                         | Menor (debido a un único amplificador, desviación menor)   | Mayor (debido a amplificadores múltiples, desviación es mayor entre millones de amplificadores)                   |
| Consumo de energía                        | Alto (necesita voltaje exterior para conducir la carga eléctrica a los registros)                    | Bajo (cada pixel es amplificado directamente)   |
| Velocidad de reacción                     | Lento (se debe esperar que toda la señal fuera recolectado para la amplificación y conversión)       | Rápido (cada pixel es amplificado en paralelo)  |
| Costo                                     | Alto (necesita crear canales extras de transmisión y posee menor rendimiento de producción que CMOS) | Bajo (utiliza el mismo procedimiento de fabricación de la industria de transistores)                              |

Los fotodiodos sólo captan intensidad de luz pero no colores. En la mayoría de las cámaras digitales se utiliza un mosaico filtro de color que se antepone a los fotodiodos, un ejemplo típico de ello es el filtro Bayer como se muestra en la Figura 2, donde se puede observar que cada cuadrado de 4 pixeles conforma una unidad, donde hay 50% de color verde, y 25% de color rojo y azul. El mayor porcentaje asignado al color verde se debe a la máxima sensibilidad del ojo humano al color verde y amarillo. Así que una imagen “cruda” captada por el sensor se trata meramente de una matriz del valor de la intensidad de luz asociada a cada pixel con su correspondiente color, la cual debe ser procesada por el procesador de la cámara interpolando intensidades de luz de los 4 pixeles que conforman una unidad RGB (R de Red, G de Green y B de Blue por sus siglas en inglés), y luego del algoritmo de compresión de imagen seleccionado (por ejemplo, .jpg), se obtiene la imagen final que se visualiza en la pantalla del computador.



**Figura 2.** Filtro Bayer usado en las cámaras digitales.

El efecto de filtro de Bayer hace que los contornos en las imágenes digitales se vean borrosos debido a la interpolación que se hace en los cuadros de 2x2, el cual no es deseable para los propósitos de medición de alta precisión, ya que se podría perder hasta un 50% de precisión comparándose con una cámara digital sin filtro Bayer (Luhmann, Hastedt y Tecklenburg, 2006) [ref. 20]. Sin embargo, el costo de una “verdadera” cámara digital de color sin filtro Bayer como el “JAI 3-CCD Area Scan” es sumamente elevado, ya que utiliza una prisma para descomponer los tres colores que son detectados luego por tres sensores CCD, y es necesario su uso únicamente cuando hay interés en el análisis espectral de luz. Para efectos de esta investigación que busca medir el movimiento de un punto a base de algoritmos de reconocimiento y localización de un patrón, una cámara monocromática sería la mejor opción en cuanto a eficacia y costo.

Por las razones anteriormente mencionadas y considerando la compatibilidad con el computador y el programa MATLAB, así como la futura posibilidad y versatilidad de poder implementarse con otros controladores en tiempo real, se escogió una cámara de la marca Allied Vision Technologies (AVT), de la serie Manta con el modelo G-223 para el proyecto.

La Manta G-223 es una cámara industrial “GigE”, lo cual es conocido comúnmente como la “cámara IP” o cámara de red Ethernet (GigE: Gigabyte Ethernet), ya que su conexión con el computador o controlador se realiza vía cable Ethernet. Sus especificaciones se listan la Tabla 2, y en Figura 3 se muestra una imagen de la cámara.

**Tabla 2.** Especificaciones de Manta G-223

|  |   |
|--|---|
| Interfaz   | IEEE 802.3 1000BASE-T                   |
| Resolución   | 2048x1088                               |
| Sensor   | CMOSIS CMV2000                          |
| Tipo de sensor   | CMOS Progressive                        |
| Tamaño de sensor   | Tipo 2/3 pulgadas                       |
| Tamaño de las celdas   | 5.5 $\mu\text{m}$                       |
| Montura de lentes  | Montura tipo C                          |
| Velocidad de fotogramas (cuadros por segundo) a la máxima resolución | 53.7 cuadros por segundo                |
| Convertidor Analógico Digital  | 12 bits                                 |
| Temperatura de operación   | +5°C ~ +45°C                            |
| Fuente de poder  | 8~30 VDC                                |
| Consumo de energía   | 2.7 W                                   |
| Masa   | 180 g                                   |
| Dimensiones  | 86.4 x 44 x 29 mm incluyendo conectores |

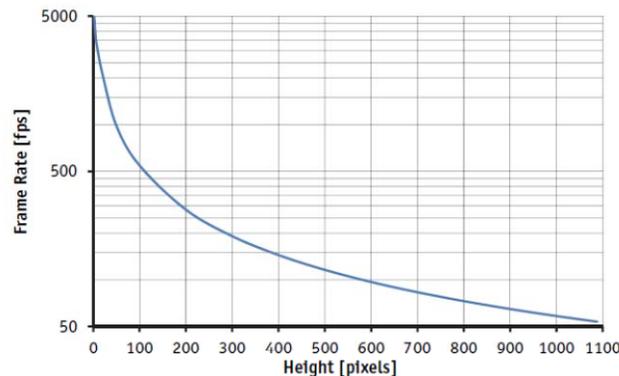
Fuente: Adaptado y traducido de la hoja de especificaciones de la cámara Manta G-223.



**Figura 3.** La cámara digital Manta G-223, AVT.

A diferencia de las cámaras comerciales que son diseñados para fines fotográficos o artísticos, las cámaras de AVT son cámaras de “visión de máquina” para aplicaciones

industriales, por lo que poseen características que se ajustan a los requerimientos de este proyecto y que no están presentes en las cámaras comerciales, dentro de las cuales se pueden mencionar: Búfer FIFO (acrónimo en inglés de First In, First Out) incorporado de 128 MBytes, control de la ganancia de 0 a 26 dB (permite ajustar la intensidad captada de luz), control de tiempo de exposición (desde 18  $\mu$ s a 126 s, en incrementos de 1 $\mu$ s), selección de la Región de Interés ROI (acrónimo en inglés de Region of Interest). Esta última propiedad es muy importante ya que la selección de una menor ROI, la cámara permite alcanzar aún una mayor velocidad de fotogramas. Dado que su aplicación en medición de desplazamiento de un punto, sea de un puente o de una estructura civil, siempre se da en una dirección específica, por ejemplo: movimiento vertical del centro del claro del puente, donde el movimiento en sentido transversal no es de nuestro interés o es generalmente mucho más pequeña comparado con la dirección principal. La propiedad de ROI permite, entonces, alcanzar una mayor “tasa de muestreo” en la medición de desplazamientos dinámicos. La velocidad de fotogramas que permite alcanzar la cámara con un menor ROI se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Velocidad de fotogramas de Manta G-223 como una función de la altura de ROI (Ancho igual a 2048 píxeles ). Fuente: Manual técnico de Cámaras Manta, AVT.

El control de las cámaras de AVT con MATLAB se pueden realizar gracias a que AVT proveen, en su página web, descargas libres de diferentes adaptadores para su uso con diferentes plataformas de programación, las cuales son simples ejecutables sin necesidad de



entrar a hacer modificaciones avanzadas, de forma que su implementación se hace mucho más fácil.

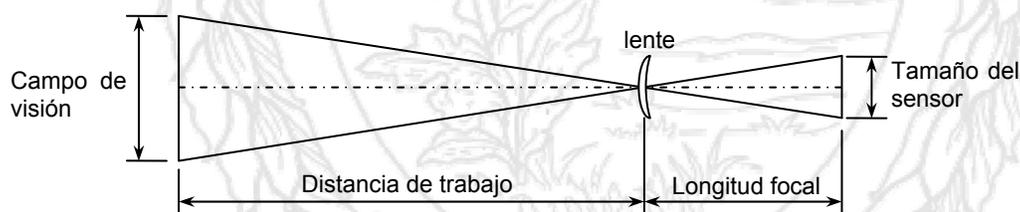


## 2.2 Configuración del sistema de medición

Los principales componentes para constituir el sistema de medición mediante imágenes digitales, además de la cámara, son los lentes, el trípode, así como la conexión mediante Ethernet a una computadora y una fuente de poder. Dado que se trata de un método de medición en campo debe utilizarse una computadora portátil.

La escogencia de los lentes depende del campo de visión y la distancia de trabajo entre el objeto y la cámara, y la longitud focal de los mismos es un parámetro importante para su escogencia. Para mediciones en laboratorio una lente con menor longitud focal debe ser utilizada mientras que para la aplicación en campo en cuanto a la medición de desplazamiento de un punto en el puente una gran longitud focal es requerida.

La estimación de la longitud focal necesaria para un campo de visión y distancia de trabajo dado, se puede realizar mediante un modelo simplificado como el modelo de la cámara estenopeica (Pinhole camera model en inglés), el cual describe la relación entre un punto en el espacio y su proyección en el plano de la imagen de una cámara estenopeica ideal, donde la abertura de la cámara es descrita como un solo punto despreciando el efecto de los lentes. En la figura 5 se presenta un diagrama muy sencillo de este modelo.



**Figura 5.** Relación entre el campo de visión, distancia de trabajo, longitud focal y el tamaño del sensor de la cámara del modelo de una cámara estenopeica.

Basándose en la relación geométrica mostrada en la Figura 5, la longitud focal requerida para cierta distancia de trabajo y campo de visión se puede encontrar con una simple regla de tres:

$$\text{Campo de visión} / \text{Distancia de trabajo} = \text{Tamaño del sensor} / \text{Longitud focal}$$

El tamaño nominal del sensor de la cámara Manta G-223 es de 2/3 pulg, esto típicamente corresponde a un formato de 8.80 mm de ancho por 6.60 mm de alto.

Los desplazamientos que pueden experimentar las estructuras civiles son pequeñas, en el orden de unas decenas centímetros como máximo para estructuras de gran envergadura y muy flexibles, pero en los puentes cortos son en el orden de milímetros. Considerando las distancias de trabajo en el laboratorio a escala reducida, que pueden ser menores que el rango de 1 m a 5 m, y un campo de visión de 30 cm x 30 cm, por ejemplo, para monitorear el movimiento de un punto, se necesitaría una lente con longitud focal de 20 mm a 110 mm aproximadamente. Figura 6 ilustra el lente de 18 mm a 108 mm utilizado en una prueba de laboratorio de deflexión estática en el modelo de una cercha.



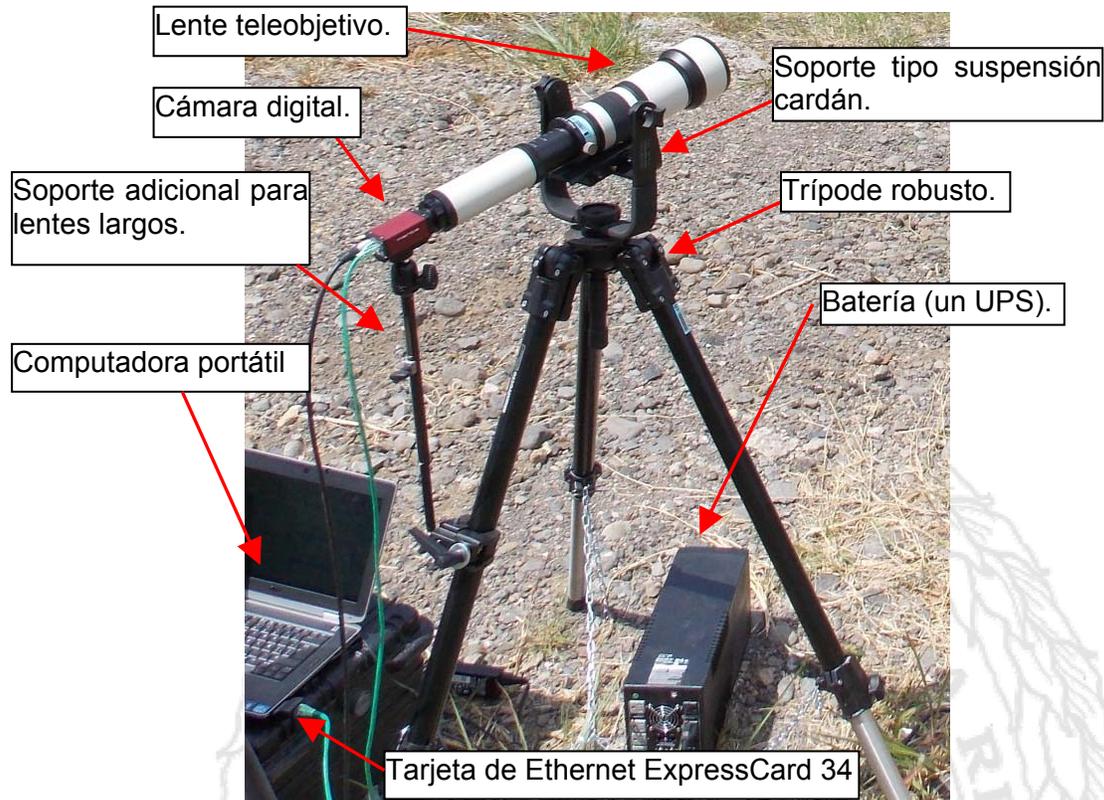
**Figura 6.** Lente de 18 mm a 108 mm de longitud focal utilizado en prueba de laboratorio.

La distancia de trabajo en las mediciones de campo de la deformación vertical de un punto en el puente puede ir fácilmente desde unos 20 m hasta inclusive más de 200 m. Dado que la deformación vertical que experimentan los puentes es pequeña, se puede considerar igual un campo de visión de 30 x 30 cm, lo que resulta en una longitud focal de 440 mm a 4400 mm, este es el rango de longitud focal de un lente teleobjetivo a super-teleobjetivo, e inclusive, para una distancia focal de 4400 mm sólo se alcanzaría por un telescopio de alta categoría para observaciones astronómicas.

Dada la naturaleza innovadora de este proyecto y considerando limitaciones en el presupuesto, se adquirió un lente teleobjetivo comercial de 650 mm a 2600 mm para las pruebas de campo, el cual es un lente con la mayor longitud focal disponible en el mercado y muy accesible en cuanto a precio (menos de 500 dólares estadounidenses). El lente adquirido así como el sistema de medición en sí se muestra en la Figura 7.

Tal como se puede observar en la Figura 7, el lente teleobjetivo cuenta con un diámetro máximo de 105 mm, una longitud de 47 cm (59.1 cm para la amplificación máxima) y un peso de 2 kg. Dado el peso y la longitud del mismo, aunque el lente puede sencillamente empotrarse sobre un trípode común mediante una placa de asiento, el empotramiento al trípode no provee la rigidez suficiente como para evitar que el lente vibre ante cualquier perturbación del ambiente tal como la vibración inducida por el viento. Además, cualquier perturbación muy pequeña que sufre el sistema haría aparecer desplazamientos erróneos o “ruidos” en la medición debido a vibración del lente, el cual puede superar varias veces el rango de desplazamiento de la estructura en medición. Este detalle será discutido y analizado más adelante.

Para resolver el problema de vibración del sistema, es necesario en primera instancia, un trípode rígido y de mayor peso; y segundo, una conexión más rígida entre el lente y el trípode, lo que se traduce en la adquisición de un soporte tipo “suspensión cardán” (Gimbal type support en inglés) y un trípode sumamente robusto de 8 kg como lo que se aprecia en la Figura 7. Sin embargo, aún se hace necesario un soporte adicional para lentes largos para que la vibración vertical del lente pueda mitigarse por completo. Todo esto debido a que para propósitos comunes de fotografía, la vibración inducida por el viento en el lente con el soporte tipo cardán no afecta a la calidad de las fotografías, pero sí lo hace en nuestro caso, ya que la precisión es del nivel sub-milimétrica, y cualquier vibración mínima ya es capaz de introducir un ruido mucho mayor a la propia medición del desplazamiento.



**Figura 7.** Lente teleobjetivo y el sistema de medición.

Por último, por ser una cámara conectada mediante puertos Ethernet y al ser una transmisión en tiempo real de imágenes de alta resolución (requiere el soporte a paquetes Jumbo), es necesario la adquisición de una tarjeta de Ethernet de ExpressCard de 34 mm para la comunicación con la computadora portátil, pues, el puerto Ethernet integrado no posee las configuraciones necesarias para la mencionada demanda en la transmisión. Dado que se busca hacer procesamiento de imágenes en tiempo real, mientras mayor sea la capacidad de procesador, mayor eficiencia se obtendrá. En este caso, una computadora portátil de marca Dell, con un procesador INTEL i5 de dos núcleos es utilizada para el sistema. La fuente de poder es simplemente una batería UPS que provee fluido eléctrico tanto a la cámara como a la computadora portátil.

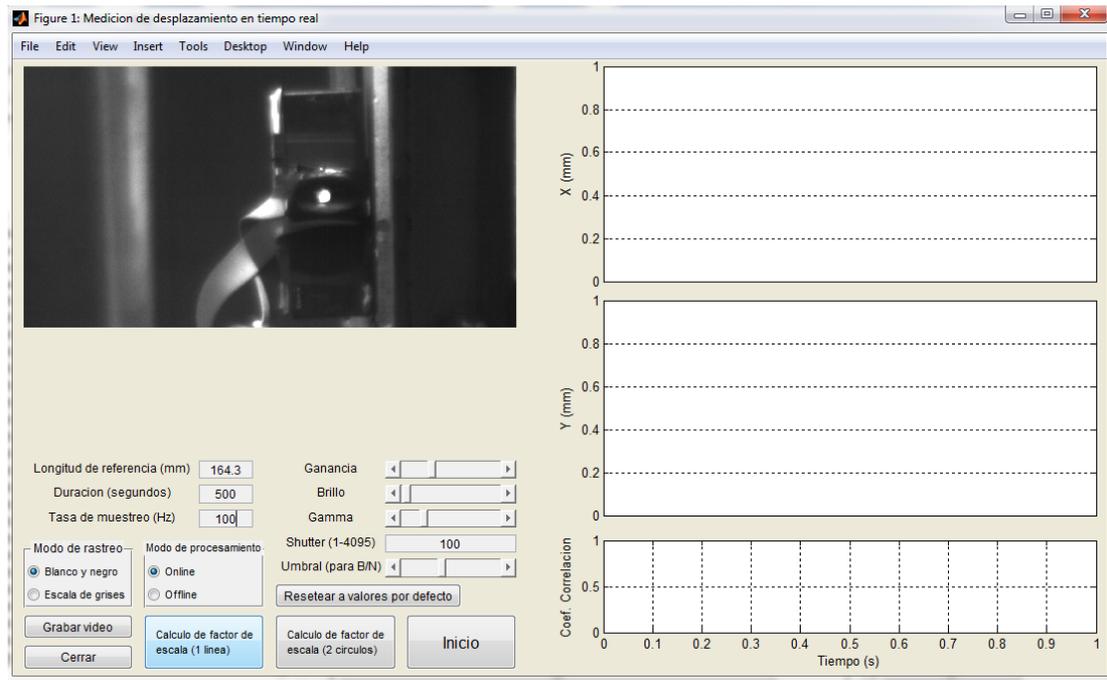
## 2.3 Diseño del programa de computación para el control de la cámara y algoritmos de procesamiento de imágenes digitales

El cerebro de todo el sistema de medición basado en la “visión” está en el programa que se diseña en el lenguaje MATLAB para el control de la cámara, así como el algoritmo propuesto para el procesamiento de imágenes digitales en tiempo real. Para que el uso del sistema se dé en forma fluida y amigable con el usuario, es necesario la creación de una interfaz gráfica de usuario donde le permita el control de la cámara y modificar sus diversos parámetros a las condiciones de campo, así como para introducir la longitud y dirección de referencia, y para dar el inicio a la medición en tiempo real.

### 2.3.1 Gráfico de Interfaz de usuario

La interfaz de usuario creada mediante las herramientas de GUI (Graphic User Interface) de MATLAB se muestra en la Figura 8. Al lado izquierdo superior está la ventana donde se tiene la visualización en tiempo real de las imágenes captadas por la cámara, así como se muestra en la Figura 8 se puede ver un punto circular blanco dentro de un fondo oscuro, el cual es un foco de iluminación o el blanco a rastrear. Esta visualización es la guía que permite al usuario orientar la cámara, localizar y enfocar al blanco al que se desea rastrear. Además, dependiendo de las condiciones de iluminación ambiental y del blanco, serviría de base para ajustar los parámetros de la imagen tales como la ganancia o el tiempo de exposición del obturador (“Shutter” en la interfaz), los cuales son los controles que se encuentran en la parte central inferior del interfaz y se describen a continuación.

La ganancia es el parámetro que permite aumentar o bajar la intensidad de luz de la imagen captada mediante circuitería interna de la cámara. Este control es esencial para adaptar la cámara a diferentes condiciones de iluminación ambiental. Sin embargo, dado que es una ganancia incrementada internamente en la cámara, una mayor ganancia también implica la presencia de mayor ruido en las imágenes.



**Figura 8.** Interfaz principal del sistema.

El brillo es el parámetro que permite ajustar el brillo total de la imagen. A un brillo mayor el contraste se reduce y se pierde detalles de la imagen.

Gamma se refiere a la corrección gamma o codificación gamma que se realiza en las imágenes que busca compensar ciertas propiedades de la visión humana optimizando de esta forma el ancho de banda en bits de la luz aprovechable a los ojos humanos.

Shutter (1-4095) es el tiempo de exposición a luz de los foto-sensores controlado por el obturador en múltiplos de 4 micro-segundos ( $\mu$ s). Por ejemplo, un valor mínimo de 1 asignado en el control de Shutter equivale a un tiempo de exposición de la imagen de 4  $\mu$ s, mientras que un valor máximo de 4095 equivale a 0.01638 segundos. El tiempo de exposición determina la cantidad de luz que puede entrar al sensor, por lo que a mayor tiempo, más luminoso está la imagen. Dado que el interés del sistema es poder captar la

información de movimiento del blanco en el tiempo, se busca usar el valor mínimo posible para que cada imagen tomada sea la más “instantánea” posible, con la limitante de que dependiendo de la condición de iluminación ambiental, el blanco puede volverse indistinguible para tiempos de exposición cercanos al mínimo, por lo que en la aplicación real del sistema es frecuente encontrar con la necesidad de aumentar la ganancia de la imagen.

Umbral (para B/N) es el control que define el umbral que separa lo que es blanco y lo que es negro en la conversión de la imagen de escala de grises a una imagen de blanco y negro. Una cámara monocromática devuelve una imagen a escala de grises que representa la intensidad de luz con números enteros desde 0 hasta 255. Donde 0 es total oscuridad (negro) y 255 es luminosidad total (blanco). Dependiendo del contraste en la intensidad de luz entre el blanco y el entorno, una adecuada definición del umbral permite al algoritmo discriminar el blanco del entorno y efectuar correctamente la labor de conversión de la imagen a escala de grises a imagen en blanco y negro (B/N): “el blanco” en blanco y los demás, en negro, para así poder rastrear el blanco en tiempo real.

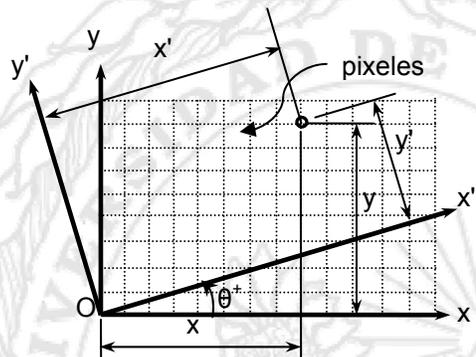
### *2.3.2 Metodología para la especificación de sistema de coordenadas y el cálculo de la escala (mm/pixel)*

Las imágenes digitales a escala de grises es en realidad una matriz matemática del tamaño de ancho por el alto en pixeles de la cámara (por ejemplo en este caso, usando la resolución completa de la cámara, sería una matriz de 2048 columnas por 1088 filas), donde cada pixel corresponde a una entrada de la matriz con un números entero entre 0 y 255 asignado de acuerdo a la intensidad de luz captada. Para darle un sentido físico a la imagen, es necesario brindarle a la imagen un sistema de referencia o coordenadas en “x” y “y”, y la longitud física que representa cada pixel, lo cual es necesario antes de entrar a ejecutar el algoritmo de rastreo del movimiento del blanco. Esto porque no siempre las direcciones “x” y “y” de la imagen concuerdan con las direcciones de la estructura real. Después de especificar a la imagen un sistema de referencia, los desplazamientos en pixeles medidos en

los ejes de la imagen son transformados mediante una matriz de rotación en dos dimensiones a un desplazamiento expresado en los ejes físicos:

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} X_{físico} \\ Y_{físico} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \text{sen} \theta \\ -\text{sen} \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{imagen} \\ Y_{imagen} \end{pmatrix}$$

donde el ángulo de rotación  $\theta$  se calcula internamente en el programa una vez que el usuario especifica la dirección. El concepto de rotación de ejes se ilustra en la Figura 9.

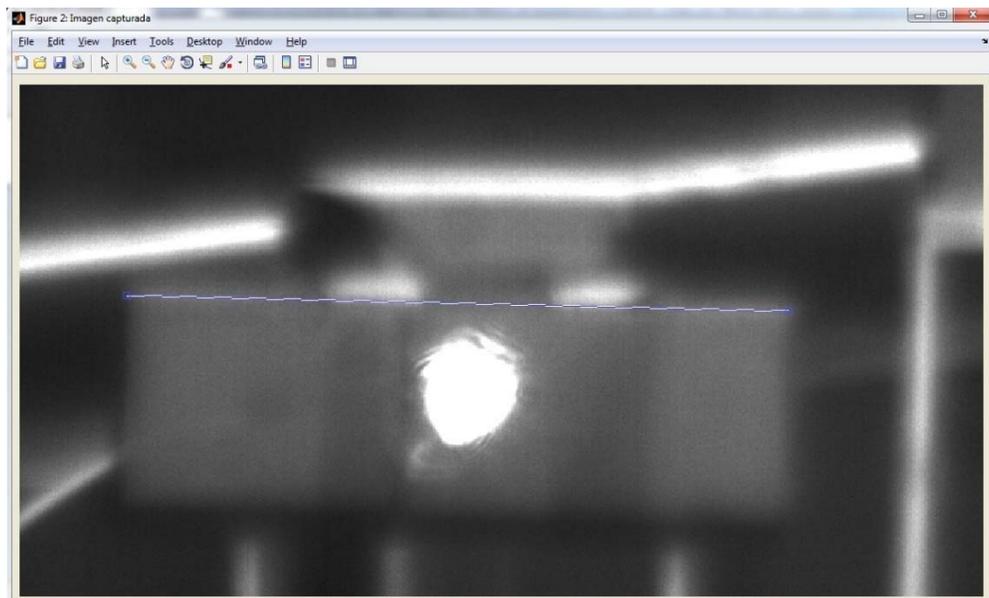


**Figura 9.** Transformación de coordenadas mediante rotación de ejes.

Mediante los botones de “Cálculo de Factor de Escala” que se encuentran por debajo del interfaz de Figura 8, el usuario puede entrar a la subrutina de cálculo de factor de escala donde hay dos opciones: puede usar una línea de referencia para especificar el factor de escala así como la dirección de alguno de los ejes “x” o “y”, o también puede basarse en dos blancos circulares previamente definidos donde la distancia entre ellos es conocido y están colocados de forma que indican la dirección del movimiento en uno de los ejes “x” o “y”. Antes de ejecutarse las subrutinas, es necesario especificar la longitud de referencia en milímetros en la interfaz principal del sistema.

Se puede ver en la Figura 10 un ejemplo donde se especifica en la imagen una línea de referencia para obtener tanto la escala como la dirección de uno de los ejes. En el caso de

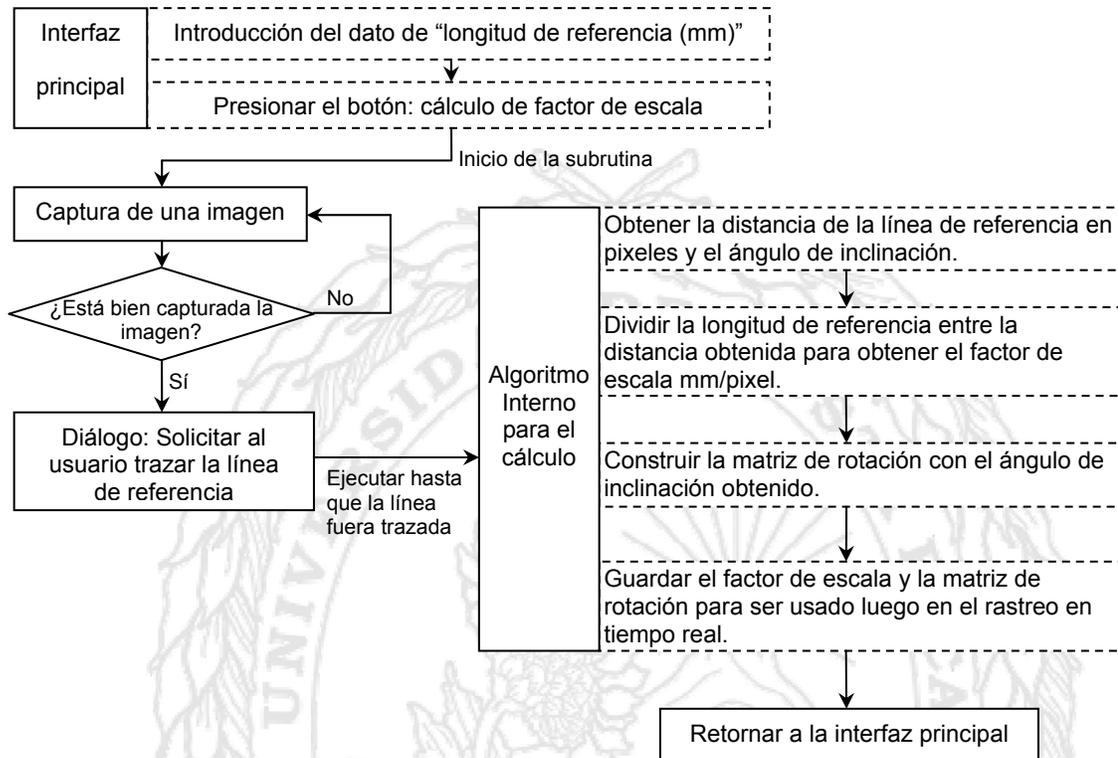
esta imagen, hay una caja negra rectangular con dimensión horizontal conocida al que se le adhirió una fuente de luz, por lo tanto, se puede trazar una línea con referencia al borde horizontal de la caja obteniendo así el factor de escala mm/pixel y la dirección del sistema real de coordenadas.



**Figura 10.** Obtención del sistema de referencia y la escala de conversión en mm/pixel.

Dado que los bordes captados por las imágenes nunca serán totalmente “agudos”, además de que el enfoque del lente comercial no es lo óptimo, es recomendable que la longitud de referencia sea lo más cercana posible a las dimensiones máximas de la imagen, de forma que el error inducido por el desenfoco y el borde en la referencia sea lo menor posible. Por otro lado, los gráficos mostrados por MATLAB también ofrecen la función de acercamiento a zonas específicas de la imagen, por lo que se puede obtener longitudes precisas basado en análisis de imagen.

El diagrama de flujo propuesto para la obtención de factor de escala y la especificación de los ejes de coordenadas físicas a la imagen se muestra en la Figura 11.



**Figura 11.** Diagrama de flujo diseñado para la obtención de factor de escala y especificación de ejes de coordenadas físicas a la imagen.

### 2.3.3 Algoritmo de procesamiento de imágenes digitales para el rastreo del blanco en tiempo real

Una vez teniendo el sistema de referencia y el factor de escala, se puede proceder a rastrear el desplazamiento del blanco de medición en el tiempo. Esto se realiza oprimiendo el botón "inicio" ubicado en la interfaz principal. Previo a esta acción, es necesario que el usuario



ingrese la duración en segundos que se desea rastrear y la tasa de muestreo (corresponde a la velocidad de fotograma o número de cuadros por segundo). El primero es para reservar un espacio en la memoria para almacenar los datos y el segundo depende de la necesidad de rastreo: para mediciones dinámicas, es recomendable una mayor tasa de muestreo para evitar el fenómeno de “Aliasing” (sub-muestreo o “efecto de bordes dentados”); mientras que para mediciones estáticas o quasi-estáticas, una menor tasa es posible y la computadora tendrá una mayor holgura para realizar el cómputo y un menor consumo de energía.

El método de medición de desplazamiento consiste en rastrear el cambio de posición del blanco en una secuencia de imágenes captadas con una frecuencia de muestreo dada, comparado con la posición inicial. La ubicación del blanco de rastreo se realiza mediante una función de correlación en dos dimensiones que se define de la siguiente manera:

$$R(u, v) = \frac{\sum_{x=u}^{u+n-1} \sum_{y=v}^{v+m-1} [I(x, y)] [P(x-u+1, y-v+1)]}{\sqrt{\sum_{x=u}^{u+n-1} \sum_{y=v}^{v+m-1} [I(x, y)]^2} \sqrt{\sum_{x=u}^{u+n-1} \sum_{y=v}^{v+m-1} [P(x-u+1, y-v+1)]^2}}$$

donde:

$I(x, y) \in Z^{q \times r}$  es la matriz de imagen con las entradas “x” y “y” y dimensión  $q \times r$ .

$P(x, y) \in Z^{m \times n}$  es la matriz de imagen patrón, con “m” número de filas y “n” columnas.

$R(u, v) \in \mathfrak{R}^{q-m+1 \times r-n+1}$  es la matriz de correlación bi-dimensional normalizada entre el patrón y la imagen en la posición  $(u, v)$ .

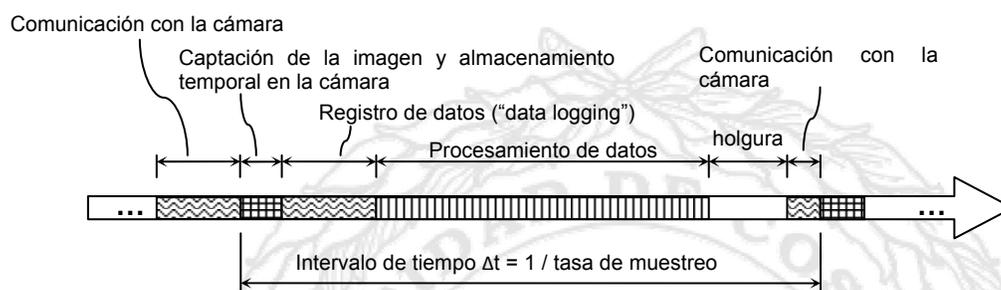
Como la matriz de imagen patrón es más pequeña que la matriz de imagen, la primera va desplazando a lo largo de toda la imagen con los movimientos  $(u, v)$  y calculando la correlación asociada a cada coordenada  $(u, v)$ . Una vez obtenida la matriz  $R(u, v)$ , la ubicación del valor máximo obtenido en la matriz de correlación correspondería a la posición de la imagen patrón en la imagen captada.

Es importante señalar que el cálculo de la función de correlación bi-dimensional demanda bastante esfuerzo computacional ya que por cada punto  $(u,v)$  de la matriz de correlación implica " $m \times n$ " operaciones de multiplicación y " $(m \times n) - 1$ " de adición, de forma que el esfuerzo computacional necesario para generar una matriz de correlación son  $\{(q-m+1) \times (r-n+1) \times \{(m \times n) + (m \times n) - 1\}$  operaciones, lo cual para una imagen de  $2048 \times 1088$  significaría un orden de  $4 \times 10^{10}$  operaciones computacionales, para esto asumiendo que la imagen patrón tiene una dimensión de  $100 \times 100$  pixeles. A pesar de que MATLAB cuenta con la optimización en el cálculo de la correlación normalizada (Lewis, J.P., 1995) [ref. 21], difícilmente logra satisfacer las exigencias en cuanto a tiempo en una medición en tiempo real.

Considerando que en la aplicación real en la medición de desplazamientos en ingeniería civil, por ejemplo, en movimiento de puentes o en pruebas de laboratorio, los desplazamientos de interés se dan generalmente en una sola dirección y dentro un cierto rango, resulta ventajoso emplear la propiedad ROI (Región de Interés) de la cámara, controlable desde MATLAB, definiéndola antes de ejecutar el algoritmo del mismo, esto no sólo reduce significativamente el tiempo necesario para el cálculo de la función de correlación, sino también permite aumentar la capacidad en cuanto a la velocidad de fotogramas permitida por el hardware de la cámara.

En las mediciones dinámicas de un punto en un puente en vibración, donde generalmente las frecuencias de los modos predominantes de vibración andan por debajo de los 10 Hz, es necesario, por el teorema de Nyquist, que la tasa de muestreo sea superior a los 20 Hz. Sin embargo, las vibraciones de modos superiores de mayores frecuencias, podrían provocar "efecto de borde dentado" en la señal captada, aunque comúnmente la vibración en forma de desplazamiento es regido por el primer modo de flexión y torsión. Pero de todas formas, a mayor sea la tasa de muestreo, más veraz puede ser el desplazamiento medido. Sin embargo, el tiempo necesario para procesar imágenes a escala de grises, específicamente para calcular la función de correlación, no logra satisfacer el requerimiento de una tasa de muestreo de 20 Hz, pues, esto implica un intervalo de tiempo disponible de 0.05 segundos

para el procesamiento de datos y otras labores tales como se ilustran en forma simplificada y esquemática en la Figura 12, donde además del tiempo dedicado al procesamiento, es necesario tomar en cuenta los tiempos requeridos para la comunicación entre el sistema operativo y el hardware, registro de datos, además de una holgura necesaria para la visualización en tiempo real de los resultados.



**Figura 12.** Requerimientos en cuanto a tiempo para mediciones en tiempo real.

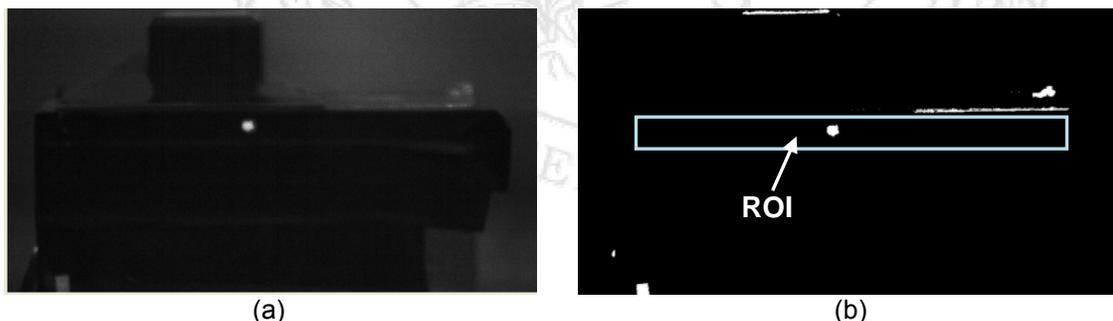
Para poder reducir aún más la demanda del tiempo en el cómputo de la función de correlación, es necesario convertir la imagen a escala de grises a una imagen binaria (de blanco y negro, B/N). Esto reduce drásticamente el esfuerzo necesario en computación para calcular la función de correlación, debido a que originalmente las operaciones que se realizan en la imagen a escala de grises, están basados en números enteros sin signo de 8 bits (0 a  $2^8-1$ , o sea 0 a 255); mientras que para una imagen binaria son sencillamente operaciones con 1 y 0. Tanto la conversión a imágenes binarias, así como la alta velocidad de fotogramas que permite la cámara al escoger una menor ROI, hace posible alcanzar la tasa de muestreo hasta unos 30 Hz.

Con el diseño adecuado de una pantalla negra con un pequeño bombillo LED (Light-Emitting Diode en inglés, o “diodo emisor de luz”) como blanco, o un fondo totalmente oscuro con un solo punto de color blanco, de forma que dentro de ROI, después de la conversión de imagen a B/N (y por supuesto, a aplicar un umbral de conversión adecuado), no existiera ningún otro punto blanco a la izquierda del blanco de rastreo, sería posible acelerar al máximo la labor de rastreo mediante la búsqueda de números “1” en ROI (1 es blanco y 0 es

negro en una imagen binaria). La restricción sería que no debe aparecer ningún otro punto blanco o “1” a la izquierda del blanco de rastreo, ya que la función de búsqueda de “1” empieza columna por columna de izquierda a derecha en la matriz. Una vez hallada la columna donde aparecen los primeros puntos blancos, se confina la búsqueda a una zona muy reducida alrededor de ellos, pero ya con la función de correlación propiamente. La implementación de esta técnica permite alcanzar a tasas de muestreo mayores a los 100 Hz.

Debido a diferentes escenarios y necesidades en cuanto a la medición, que pueden ser dinámicas, estáticas o quasi-estáticas, el programa está diseñado de tal forma que permite dos modos de rastreo: (1) en blanco y negro, ó (2) a escala de grises; y también dos modos de procesamiento: (a) en línea (o en tiempo real) ó (b) fuera de línea. Son opciones que pueden combinarse entre ellos en la implementación del sistema y se selecciona en la interfaz principal.

El modo en B/N requiere de un blanco con suficiente contraste con el fondo, por lo que generalmente una luz LED con un fondo negro, que podría ser una pantalla negra, son necesarios. En condición de iluminación controlada en laboratorio, un punto de color blanco con un fondo negro puede ser suficiente para que ante un umbral apropiadamente definido discrimine el blanco del fondo negro. Figura 13 muestra el ejemplo de la conversión a una imagen binaria, en condiciones de laboratorio, donde hay un punto blanco hecho con “corrector líquido” sobre una serie de cinta negra adherida sobre un bloque de metal, donde el último es un sistema de un grado de libertad sobre una mesa vibratoria, así como se muestra en (a); y (b) es la imagen binaria después de conversión.

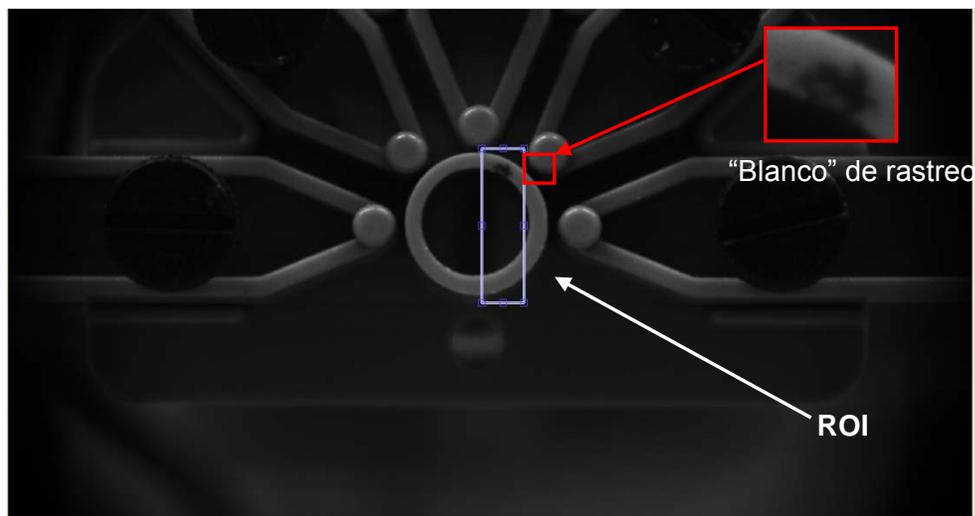


**Figura 13.** Conversión a imagen binaria y la definición de ROI para el rastreo del blanco.

Siempre que la iluminación ambiental lo permita y que no haya superficies en el fondo de la imagen o alrededor del blanco que provoquen reflejos hacia la cámara, es posible convertir totalmente, excepto el blanco, al fondo de la imagen en color negro reduciendo al máximo el tiempo de exposición de la cámara, ya que al entrar una cantidad sumamente reducida de luz a los foto-sensores, la imagen queda completamente oscura excepto el blanco. Además, más reducido esté el tiempo de exposición, mayor precisión se tendrán en la medición del desplazamiento del blanco, ya que se aproximan cada más a imágenes captadas en un instante puntual de tiempo.

Para garantizar siempre la capacidad de conversión del fondo de la imagen a negro manteniendo el “blanco” en color blanco, se puede instalar en el objeto de rastreo una pantalla negra suficientemente grande de forma que en ROI (región por donde el blanco se desplaza) tenga siempre un fondo totalmente negro, así como se muestra en Figura 13 (b), y luego ya no se tendrá problemas para rastrear el blanco en modo de B/N.

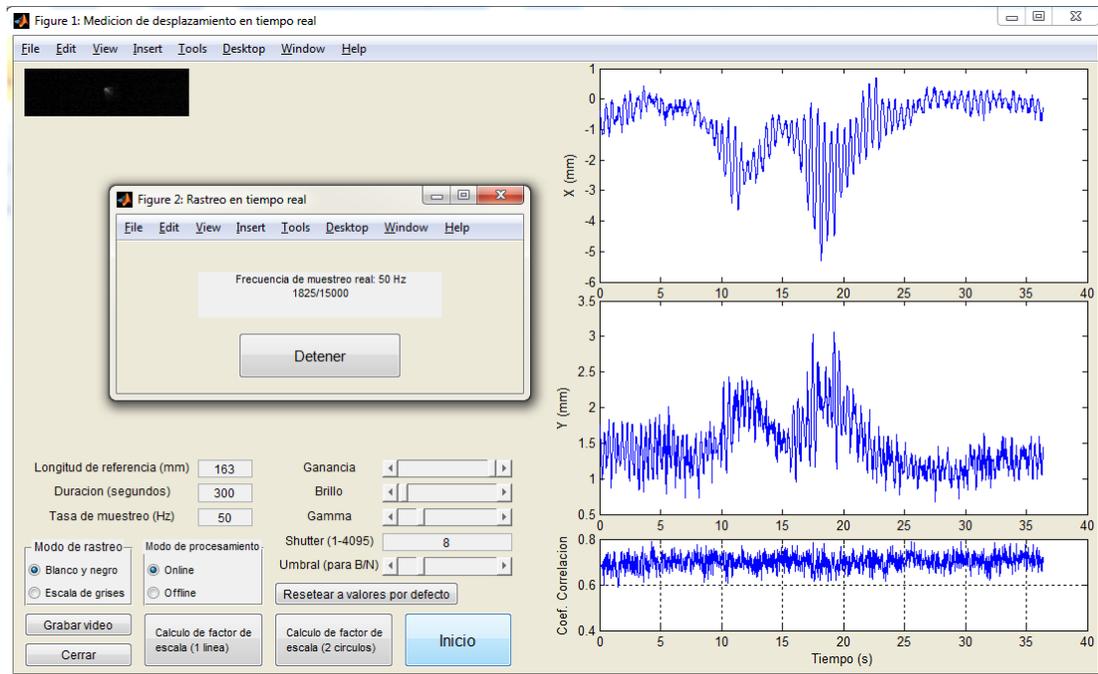
El modo de rastreo a escala de grises es apto para mediciones estáticas o quasi-estáticas dado el esfuerzo computacional necesario para calcular la función de correlación. No obstante, tiene la ventaja de tener ningún tipo de limitación en cuando a iluminación, fondo o el blanco de rastreo. Como se puede apreciar en la Figura 14, donde muestra como ejemplo, el nodo de un modelo educacional de puente tipo cercha. El “blanco” o mejor dicho, el patrón de rastreo puede ser tan simple como una mancha hecha en el punto donde se interesa medir el desplazamiento, siempre que el patrón escogido no se repita en ningún otro lugar de ROI.



**Figura 14.** Blanco de rastreo a escala de grises.

Dependiendo del tamaño de ROI, la máxima tasa de muestreo que permite alcanzar el modo de rastreo a escala de grises puede variar, pero en términos generales es alrededor de un máximo de 5 Hz.

El modo de procesamiento en línea permite al usuario visualizar, en tiempo real, los desplazamientos medidos con la cámara según el factor de escala y las coordenadas "x" y "y" especificadas. Figura 15 muestra cómo se visualiza el desplazamiento en tiempo real en el interfaz principal.



**Figura 15.** Visualización de los desplazamientos en tiempo real en la interfaz principal.

Una vez que el rastreo inicia, la pantalla de visualización a la izquierda de la interfaz principal se reducirá únicamente al área de ROI, donde el usuario puede monitorear en tiempo real el movimiento del blanco dentro de ROI. Por otro lado, la interfaz también desplegará el desempeño en tiempo real del sistema en una pequeña ventana, donde se puede observar la cantidad de cuadros que se lleva en este momento, contra la cantidad total de cuadros necesarios para completar la duración de monitoreo. Además, también se muestra en esta pequeña ventana la tasa de muestreo actual del sistema, la cual es una información esencial para conocer el buen funcionamiento del sistema.

Este sistema de medición en tiempo real se apoya en el procesador de una computadora portátil común, y también en el sistema operativo Windows, el cual no es una plataforma determinística, por lo que puede estar realizando otras tareas de rutina o programas al mismo tiempo, lo cual, eventualmente, puede afectar a la capacidad de procesamiento en tiempo real. Además, como la cámara se conecta a la computadora portátil mediante puertos de Ethernet, si existiera algún deterioro en el cable o en los conectores de red Ethernet,

influirían también en la capacidad de transmisión de datos. Por ende, el despliegue en tiempo real de la tasa de muestreo actual, permite al usuario detectar anomalías en el sistema y proceder a tomar acciones correctivas.

Los desplazamientos del blanco medidos en píxeles en las imágenes son transformados, mediante una matriz de rotación, a desplazamientos respecto los ejes de coordenadas físicas, y también a milímetros mediante el factor de escala. Los desplazamientos en las coordenadas “x” y “y” se muestran en tiempo real en los gráficos titulados “X (mm)” y “Y (mm)”, pero además, hay un tercer gráfico en la parte derecha inferior de la interfaz principal que muestran el coeficiente de correlación asociado a cada desplazamiento medido, el cual permite conocer la calidad de rastreo del blanco.

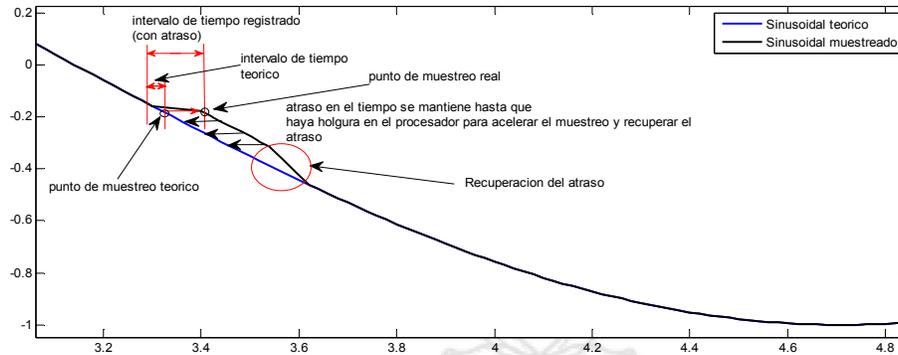
Un coeficiente de correlación igual a 1 significa que la imagen del blanco captado en un instante dado es exactamente igual en su forma a la imagen patrón del blanco (guardado como referencia antes de iniciar el rastreo); sin embargo, dadas las condiciones cambiantes en la iluminación, perturbaciones atmosféricas y ruido (comprendido como el ruido electrónico en la detección de intensidad de luz), en la práctica esto es totalmente imposible alcanzar. De las experiencias acumuladas en pruebas de campo, en un ambiente con buenas condiciones atmosféricas y de iluminación, se puede lograr un coeficiente de entre 0.8 a 0.9 En condiciones de iluminación desfavorables y ante la presencia de perturbaciones atmosféricas (mientras mayor es la distancia de medición, mayor perturbación se percibe debido a la distorsión de luz por flujos de aire) el coeficiente de correlación puede rondar un valor de 0.6, el cual es aún suficientemente preciso el desplazamiento medido a este nivel de correlación.

El modo de procesamiento fuera de línea es el modo que almacena temporalmente todas las imágenes captadas en la memoria, y se procede a procesar las imágenes hasta que haya concluida la captación de imágenes. Dado que se almacenan las imágenes en la memoria temporalmente, la duración sería la gran limitante para este modo de procesamiento, pues, de las pruebas realizadas se concluye que sólo permite almacenar unos 2 minutos de

imágenes como máximo debido al espacio limitado en la memoria. La única ventaja de este modo es la ausencia de restricción en cuanto al tiempo requerido para procesamiento de imágenes, tal como se ilustra en la Figura 12. No obstante, con la implementación de la técnica de búsqueda de números “1” en la imagen de B/N, el tiempo necesario para el procesamiento se reduce al mínimo y es posible alcanzar tasas de muestreo superiores a 100 Hz, aún procesando las imágenes en línea (en tiempo real).

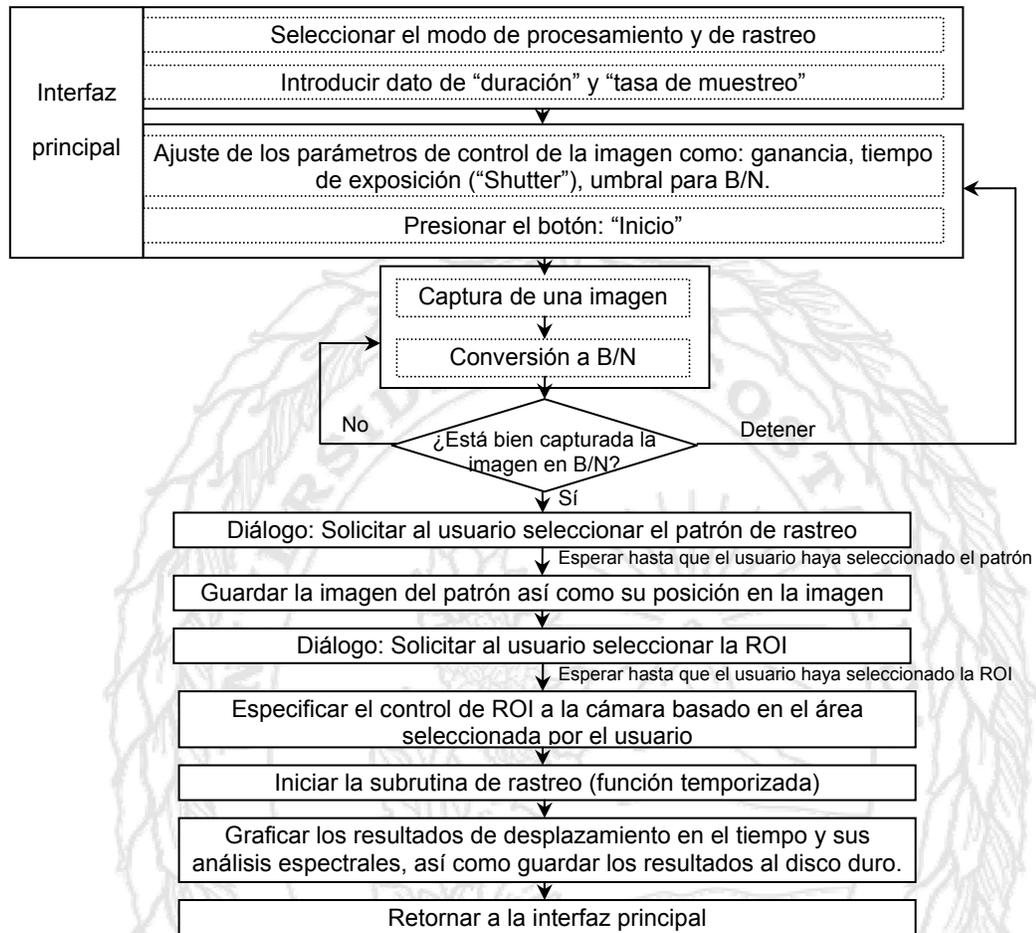
Un aspecto esencial en la tarea de rastreo en tiempo real es la temporización. Debido al hecho de que el control se está ejecutando desde MATLAB, no se utilizará el reloj interno de la cámara, sino el reloj propiamente del procesador de la computadora portátil y la función temporizador de MATLAB. Dado que el sistema operativo Windows no es determinístico, se puede esperar que se presenten momentos donde los tiempos requeridos para cada tarea, tal como se muestra en la Figura 12, se extiendan de forma que no se logren ejecutar dentro del intervalo de tiempo especificado. Este hecho hará que la próxima muestra de imagen se tomará con cierta demora. No obstante, el temporizador de MATLAB permite al usuario controlar la situación, en caso de presentar atrasos, MATLAB priorizará y destinará mayores recursos del procesador para corregir la demora, aumentando momentáneamente la tasa de muestreo para recuperar el tiempo perdido, de forma que la duración total no será afectada. La demora que se presenta aleatoriamente y la acción correctiva por el temporizador se muestran en la Figura 16, se debe indicar que estos procesos pueden introducir ruido sistemático en la señal digital. Dado que los métodos tradicionales de análisis espectral se basan en la hipótesis de una tasa de muestreo constante, este aspecto junto a la precisión del reloj del procesador, necesitarán ser evaluados mediante pruebas de validación en laboratorio y en campo.

Por último, el diseño del diagrama de flujo para la ejecución del rastreo en tiempo real se muestra en la Figura 17, y la subrutina temporizada de búsqueda de patrón en modo B/N se muestra en la Figura 18.

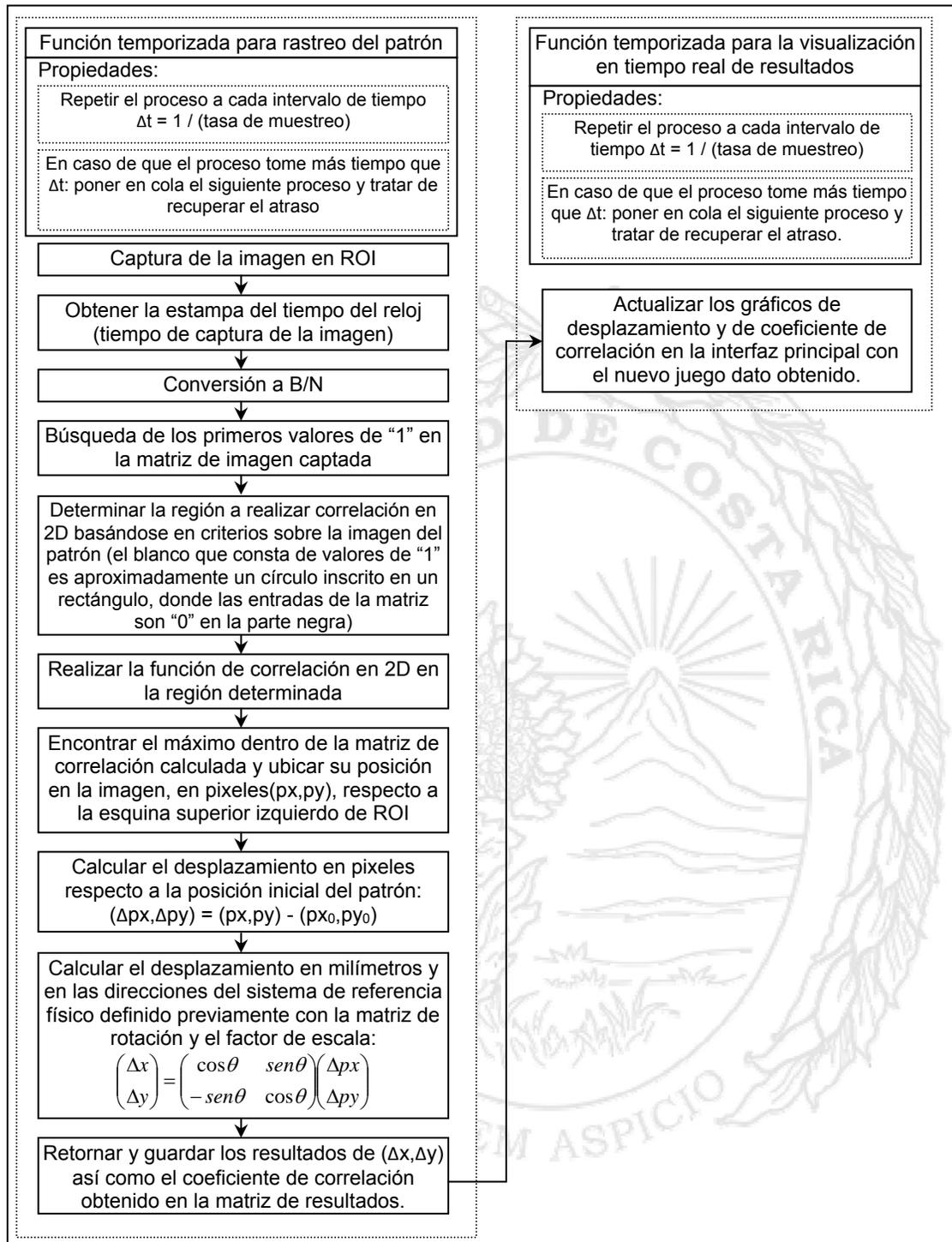


**Figura 16.** Atraso en el muestreo y su efecto en la forma de onda muestreada.





**Figura 17.** Diagrama de flujo para ejecutar el rastreo en tiempo real de desplazamiento.



**Figura 18.** Diagrama de flujo de la subrutina temporizada de búsqueda de patrón en modo B/N.

### 3. VALIDACIÓN EN LABORATORIO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Aunque a nivel internacional se han reportado en la literatura técnica experiencias exitosas en la aplicación de procesamiento de imágenes, en este trabajo se adaptó, por primera vez, una cámara de vigilancia monocromática junto con sus propiedades “inteligentes”, así como un algoritmo de procesamiento basado en la búsqueda de “1” en la matriz de imagen en B/N, permitiendo alcanzar una tasa de muestreo hasta unos 100 Hz, para hacer posible la medición de desplazamientos dinámicos a distancia y en tiempo real.

Para este nuevo sistema con planteamientos novedosos, es necesario el estudio y la validación en laboratorio de los siguientes aspectos:

- Viabilidad de utilizar las imágenes digitales como un método de medición a distancia, con la precisión requerida para aplicaciones de ingeniería.
- Capacidad, robustez y versatilidad del procedimiento y el algoritmo propuesto para satisfacer los requerimientos de una aplicación en tiempo real, bajo una tasa de muestreo de 100 Hz, y su adaptabilidad a las condiciones de iluminación presentes en laboratorio.
- Influencia de los atrasos e imprecisiones en los tiempos de muestreo, debido al uso de un sistema operativo no determinístico, en el análisis espectral de los datos.
- Efecto del sesgo en la alineación de la cámara respecto al plano de medición: casos donde la cámara no se coloca totalmente al frente y perpendicular al plano de medición, por el contrario, forma un cierto ángulo respecto al plano de medición.

La metodología y los equipos utilizados en laboratorio para este trabajo, así como los resultados de las pruebas para validar y estudiar lo concerniente a los puntos anteriores se resumen en los siguientes dos apartados.

### 3.1 Configuración de los equipos para las pruebas de validación

La validación en laboratorio fue posible efectuarla gracias a que se dispone de una mesa vibratoria Shake Table II de la empresa Quanser, el cual posee la capacidad de generar movimiento en un rango de frecuencia de 0 a 20 Hz, y un desplazamiento máximo de  $\pm 76.2$  mm; además, de un extensómetro láser de la marca MTS, el cual se muestra junto con la mesa vibratoria en la Figura 19, y sus especificaciones se muestran en la Tabla 3. Es importante señalar que la aplicación original del extensómetro láser es medir elongación de barras de acero en la prueba de las propiedades mecánicas en una máquina universal, por esta razón es su gran tamaño; sin embargo, a la fecha de la prueba de validación en laboratorio no se contaba aún con sensores láser para el uso con la mesa vibratoria. Dado que el extensómetro láser de MTS puede proveer mediciones dinámicas de hasta 100 escaneos por segundo, es adoptado aquí como la medición de referencia para validar el método de medición mediante imágenes digitales.

**Tabla 3.** Especificaciones del extensómetro láser de la marca MTS

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Serie                          | LX1500  |
| Dimensiones                    | 686 x 196 x 442 mm (27 x 7.7 x 17.4 in)   |
| Tasa de escaneo                | 100 escaneos /segundo   |
| Distancia al objetivo          | Hay opciones: 381 mm (15 in), 457 mm (18 in)  |
| Rango de medición              | 8 a 381 mm (0.3 to 15 in)   |
| Resolución                     | 0.01 mm (0.001 in)  |
| No-linealidad (máxima)         | $\pm 0.15$ mm ( $\pm 0.006$ in)   |
| Promedio de múltiples escaneos | Se calcula la media móvil, desde un mínimo de 2 escaneos hasta un máximo de 512 escaneos. |



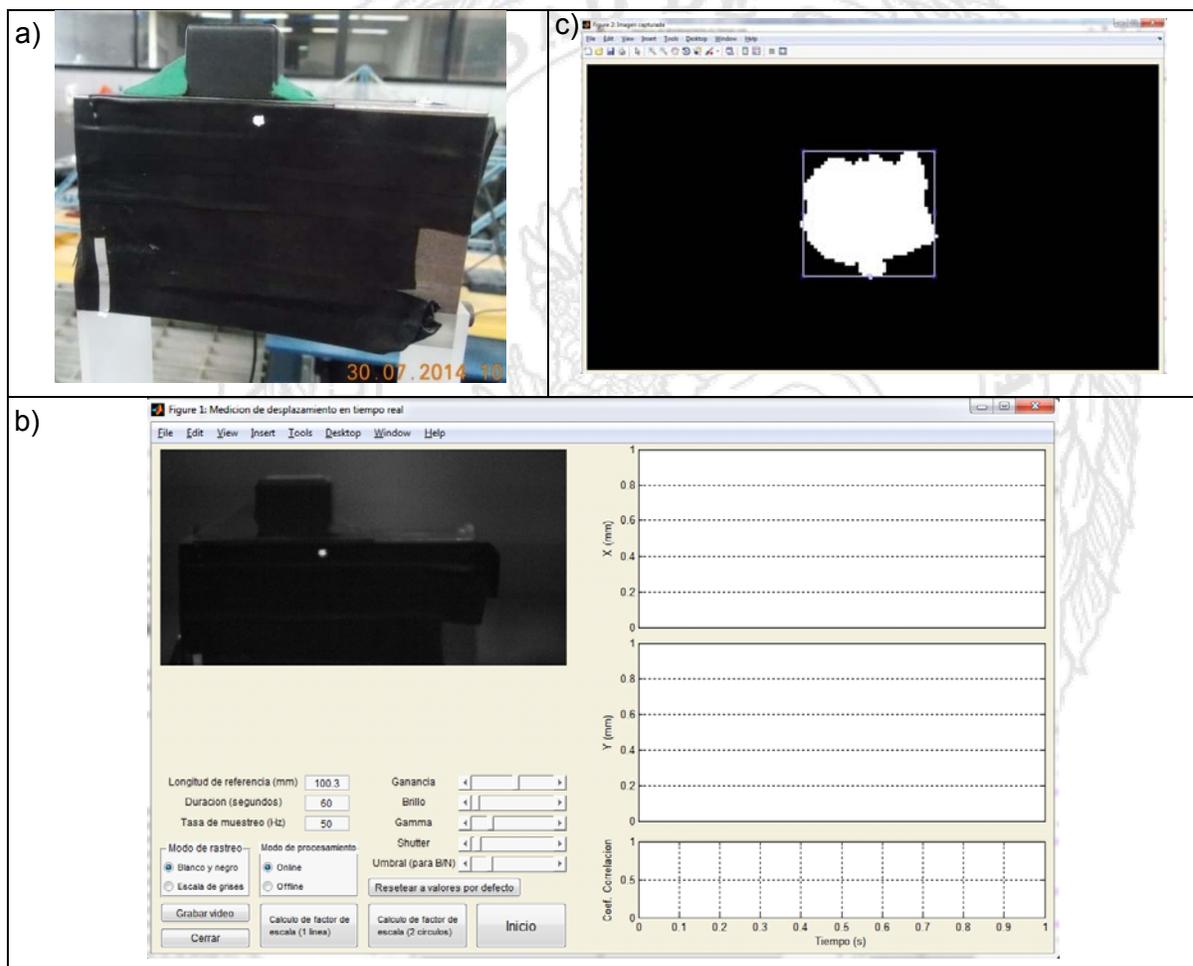
**Figura 19.** El extensómetro láser y la mesa vibratoria utilizada para la validación del sistema en laboratorio.

La señal de salida del extensómetro láser es conectada al sistema de adquisición de datos CompactDAQ de la marca National Instruments, para luego compararlas con los desplazamientos captados por la cámara digital y el algoritmo propuesto. Debido a que los tiempos de la computadora portátil (al que se conecta a la cámara) y de CompactDAQ no están sincronizados, la comparación entre las dos señales es realizada trasladando las señales captadas en el eje del tiempo hasta que las formas de onda concuerdan uno con el otro en el inicio. Si el sistema físico así como el método propuesto para la medición de movimientos dinámicos son válidos, tanto las formas de onda en el tiempo y sus amplitudes, así como el contenido de frecuencias captadas por ambos deben concordarse.

El objetivo a medir el desplazamiento es el bloque más alto dentro de los tres bloques que simulan sistemas de un grado de libertad (1 g.d.l.), tal como se puede apreciar en la Figura 19. La mesa vibratoria puede generar diversos movimientos en la base de estos sistemas de 1 g.d.l., tales como: ondas sinusoidales (0 – 20 Hz), ondas sinusoidales con incremento gradual en su frecuencia (“chirp”), o también ondas sísmicas que causarán movimientos aleatorios para el sistema de 1 g.d.l. La validez del sistema y el algoritmo serán validados utilizando estos diferentes tipos de movimiento que generará la mesa vibratoria.

Para proveer de un objetivo de rastreo idóneo, se aprovecha el bloque de acero adhiriéndole cintas negras para tener un fondo negro para la Región de Interés (ROI), y con un “corrector líquido” se hizo un pequeño punto blanco sobre la cinta negra tal como se muestra en la Figura 20; donde a) muestra cómo es que se ve realmente la preparación del objetivo y el blanco, b) es su visualización a través del lente y la cámara, y en c) es como se ve el blanco posterior a la conversión de la imagen a B/N.

El extensómetro láser está configurado a hacer 100 escaneos por segundo y que promedia cada 2 escaneos, resultando en una tasa efectiva de muestreo de 50 Hz.

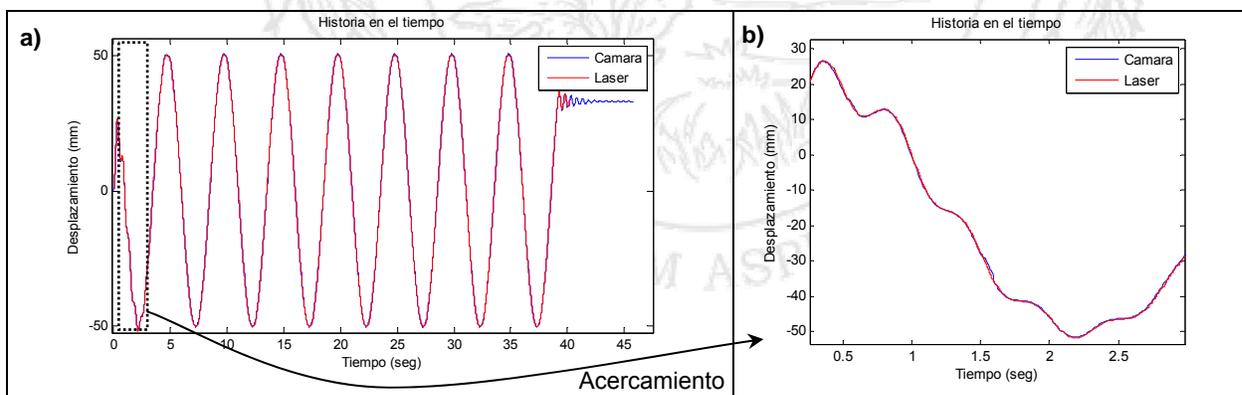


**Figura 20.** a) El objetivo de rastreo y el blanco, b) visualización a través de la cámara, c) la selección del blanco después de la conversión de la imagen a B/N.

### 3.2 Validación de la técnica de medición en tiempo real y la eficacia del algoritmo de procesamiento de imágenes digitales

Para estas pruebas se coloca la cámara perpendicular a la dirección del movimiento del objetivo, el lente utilizado para estas pruebas de laboratorio es un lente con longitud focal ajustable de 18 a 108 mm. Para las distancias de trabajo de laboratorio que son aproximadamente de 1.5 m a 2.0 m, es necesario utilizar la máxima longitud focal de este lente para poder acercarse lo suficiente al blanco en movimiento, y se pudo obtener una resolución de 0.083 mm/píxel para este caso, con una tasa de muestreo de 100 Hz.

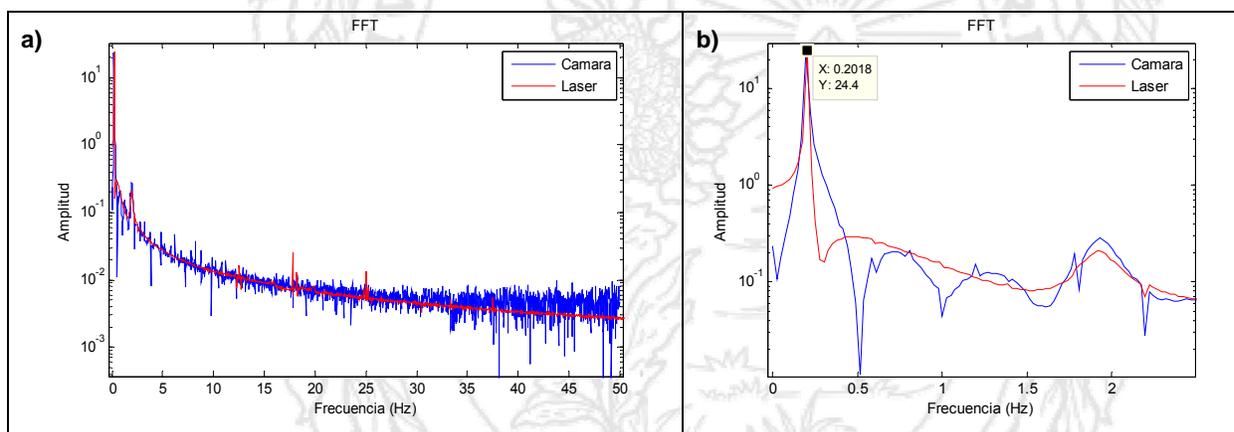
La comparación de resultados de rastreo mediante método de procesamiento de imágenes digitales y los de medición láser se muestra en la Figura 21, a) para el caso de un movimiento sinusoidal de 0.2 Hz en la mesa vibratoria y con una amplitud de 50 mm, y en b) se muestra un acercamiento a los detalles en los primeros segundos de medición. Tal como se aprecia en la figura, las mediciones de cámara y de láser concordaron casi perfectamente para este movimiento sinusoidal a baja velocidad, se puede ver en a) que no hay error ni en las forma de onda ni en las amplitudes durante toda la medición; además, en el acercamiento al detalle de los primeros segundos en b), se puede observar con mucha claridad la componente de frecuencia natural del sistema de 1 g.d.l. que se disipa rápidamente en una vibración forzada debido al amortiguamiento.



**Figura 21.** a) Comparación entre la medición de cámara y láser para una onda sinusoidal de 0.2Hz y amplitud de 50 mm, b) acercamiento a los detalles.

Dado que la transformada de Fourier es la herramienta más básica para el análisis de señales en el dominio de frecuencias, es importante comparar el espectro de Fourier obtenido de las mediciones de láser y el de la cámara, para ver si el uso de imágenes digitales como herramienta de medición introduce algún tipo de ruido o “Aliasing” en el dominio de frecuencias que podrían afectar la labor de identificación de frecuencias dominantes mediante espectros de Fourier, esto debido a que la medición basada en procesamiento de imágenes digitales no cuenta con un filtro paso-bajo previo al muestreo como lo tienen los sistemas de adquisición de datos para las señales vibratorias.

En la Figura 22 muestra el resultado de aplicar la Transformada Rápida de Fourier (FFT por las siglas en inglés de Fast Fourier Transform) a las señales de la cámara y del láser mostradas en la Figura 21.



**Figura 22.** Transformada Rápida de Fourier de las señales de la cámara y del láser: a) mostrando el rango de frecuencias hasta la frecuencia de Nyquist de la cámara, y b) el acercamiento a la zona del pico donde muestra la frecuencia dominante de la señal.

Dado que la tasa de captura de imágenes es 100 Hz, la frecuencia Nyquist para la señal generada por procesamiento de imágenes sería 50 Hz. En comparación con el espectro de Fourier de la medición láser, se puede notar en a) que la medición usando la cámara posee

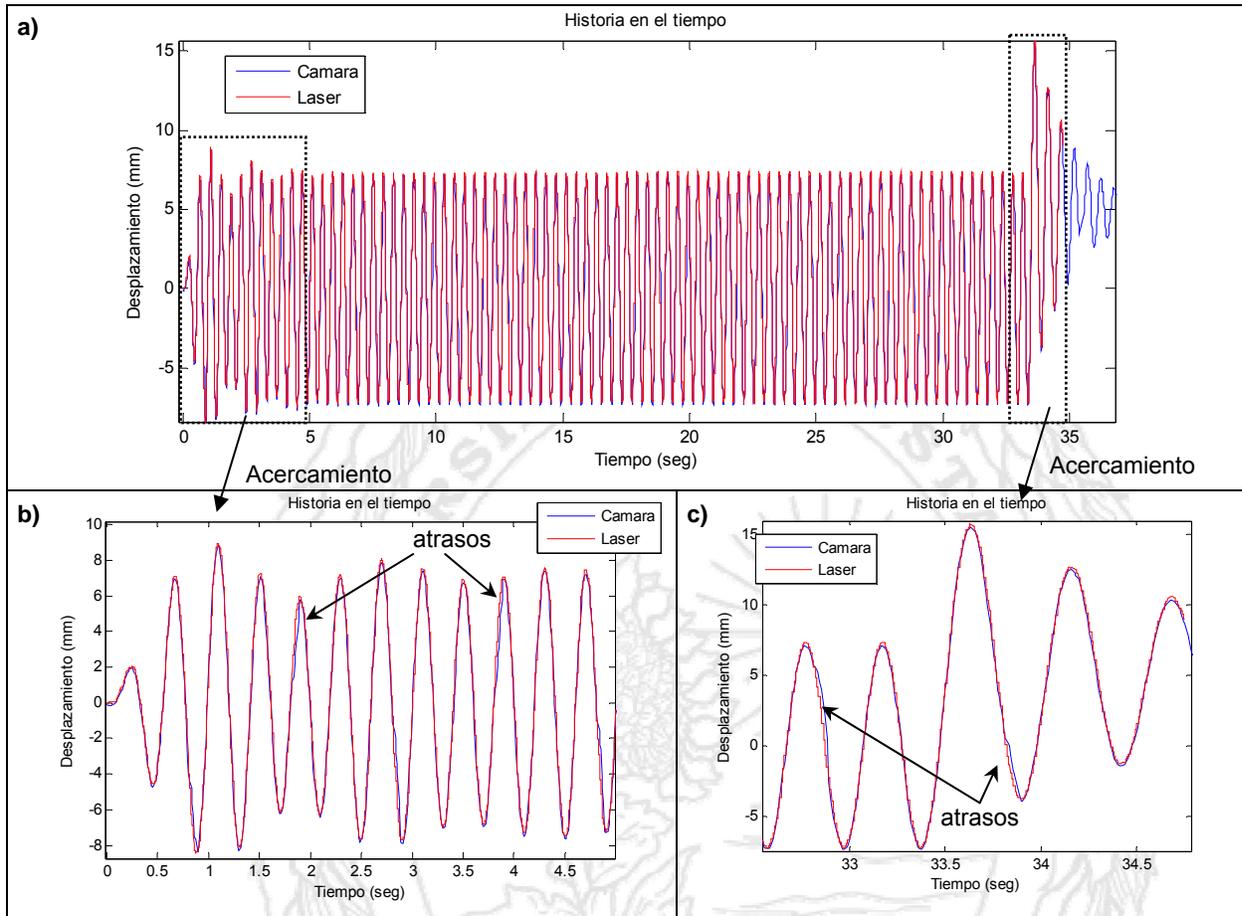
una precisión comparable con la de láser en el dominio de frecuencias, y no se observa ningún otro tipo de ruido sistemático o “aliasing” en el espectro que confundiría con la frecuencia dominante de la señal; en b) se muestra un acercamiento a la zona del pico, y se puede observar que los picos de ambos espectros concuerdan perfectamente y tienen una amplitud aproximadamente 100 veces mayor que la banda de frecuencias correspondiente al ruido (notarse que el gráfico es semi-logarítmico). El valor del pico indica justamente la frecuencia del movimiento de la mesa ya que se trata de una vibración forzada.

Dado que la cámara ha mostrado un buen desempeño rastreando movimientos lentos, se procede a aumentar la frecuencia. En la Figura 23 se muestra los resultados de medición para una frecuencia mayor, en este caso se trata de un movimiento sinusoidal de 2.5 Hz en la mesa vibratoria y con una amplitud de 50 mm. Se puede observar que en a) que tanto las amplitudes, los tiempos, así como las formas de onda concordaron durante toda la medición; en b) se aprecia que todas las variaciones en amplitud fueron captadas correctamente por la cámara, lo mismo en c) donde muestra los detalles de los últimos segundos de medición. Dado que el movimiento sinusoidal es de una frecuencia mayor, los atrasos debido al uso de un sistema no determinístico (Windows) para la adquisición de datos se aprecian con mayor claridad.

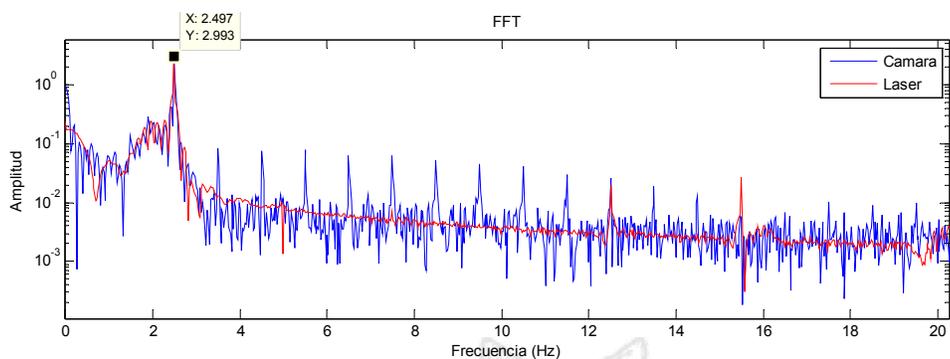
En el espectro de Fourier mostrado en la Figura 24, se puede observar el efecto de estos atrasos aleatorios en la señal debido al uso de un sistema no determinístico en la adquisición de datos, reflejado en unos picos menores sucesivos que no afectan a la identificación de la frecuencia dominante de la señal (2.5 Hz por el movimiento de la mesa vibratoria), la cual es el pico máximo que tiene una amplitud aproximadamente 10 veces mayor que los picos menores debido a ruido, y tanto las mediciones de láser y como de la cámara concuerdan en esta frecuencia.

Se concluye que con estas dos pruebas realizadas y sus análisis detallados tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, que tanto el diseño del sistema de medición basado en la visión como el algoritmo de rastreo propuesto cumplen con las

expectativas de medición de desplazamientos para aplicaciones ingenieriles, y hasta que podría alcanzar una precisión cercana a la de un extensómetro láser, con lo cual se valida el método propuesto.



**Figura 23.** a) Comparación entre la medición de cámara y láser para una onda sinusoidal de 2.5Hz y amplitud de 50 mm, b) acercamiento a los detalles de los primeros segundos, c) acercamiento a los últimos segundos.



**Figura 24.** Transformada Rápida de Fourier de las señales de la cámara y del láser.



### 3.3 Estudio de la influencia de una alineación sesgada de la cámara respecto al plano de medición.

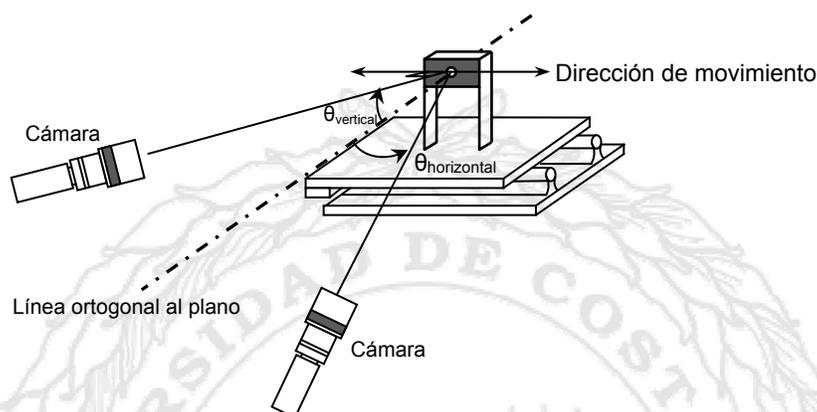
Una vez validado el sistema basado en la visión así como el algoritmo propuesto para el rastreo se estudia la influencia de la alineación de la cámara respecto al plano de medición (el plano por donde el blanco se desplaza), ya que en las aplicaciones reales de campo, no necesariamente se puede garantizar la alineación de la cámara respecto al plano de movimiento, o hay condiciones donde simplemente es imposible alinear la cámara en forma perpendicular a la dirección de desplazamiento. En la Figura 25 muestra una fotografía donde la cámara forma un ángulo vertical de respecto al plano de movimiento del blanco.



**Figura 25.** Alineación sesgada de la cámara respecto al plano de movimiento del blanco

En la Figura 26 muestra dos tipos de sesgos en la alineación de la cámara. Dado que la mesa vibratoria induce movimientos horizontales en el objetivo, se espera que un sesgo vertical no influiría en nada a los resultados de la medición (porque sigue siendo perpendicular a la dirección del movimiento), pero sí es importante estudiar si un sesgo horizontal afectaría a la precisión de las mediciones debido al efecto de la perspectiva. Se procede, entonces, a variar tanto el ángulo de sesgo vertical como de sesgo horizontal para estudiar estos efectos. Los ángulos utilizados en esta prueba se muestran en la Tabla 4, así

como los tipos de movimiento generados por la mesa vibratoria y la resolución (mm/pixel) que se alcanzó para cada ángulo de sesgo. Se puede observar que para la mayoría de los casos se repitió tres tipos de pruebas: uno con onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm, otro con onda sinusoidal con frecuencia variable “chirp”, y el último con el registro sísmico de Northridge.



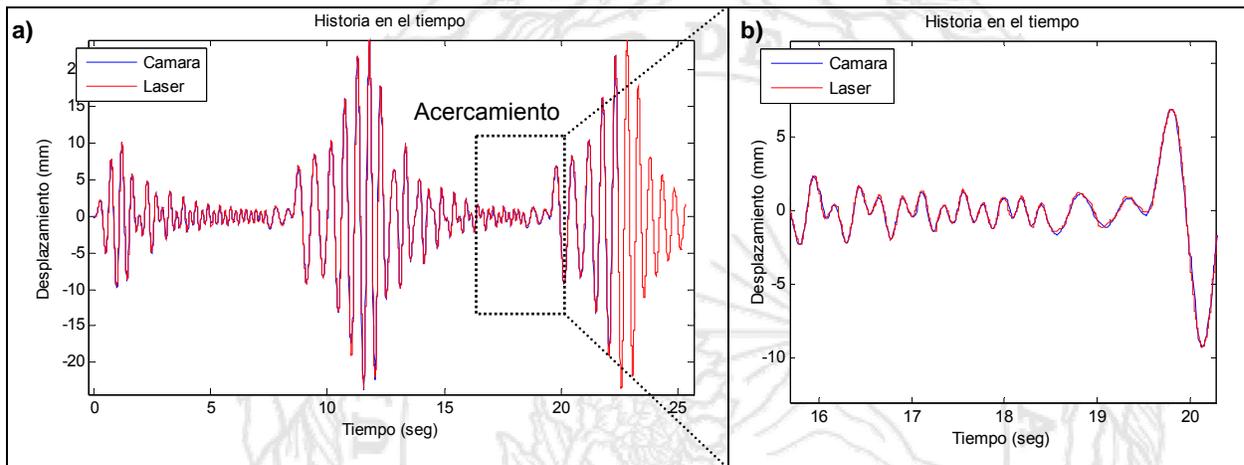
**Figura 26.** Ilustración esquemática del sesgo en la alineación de la cámara

**Tabla 4.** Ángulos de sesgo horizontal y vertical medidos .

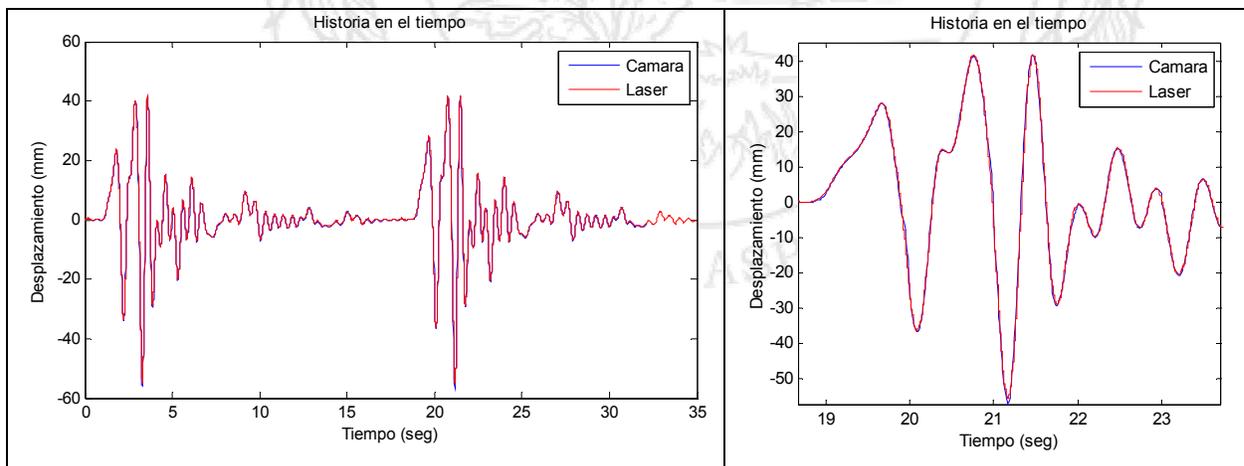
| Ángulo (grados)  | Tipo de movimiento generado por la mesa vibratoria         | Resolución (mm/pixel) |
|--|--|-----------------------|
| <b>Ángulos verticales (sesgo en el plano vertical)</b>     |  |                       |
| 12.9°  | Onda sinusoidal tipo “chirp” con amplitud inicial de 4 mm. | 0.0826                |
|  | Sismo de Northridge  |                       |
| 30.16°   | Onda sinusoidal de 4 Hz, amplitud de 4 mm.                 | 0.0982                |
|  | Onda sinusoidal tipo “chirp” con amplitud inicial de 4 mm. |                       |
|  | Sismo de Northridge  |                       |
| <b>Ángulos horizontales (sesgo en el plano horizontal)</b> |  |                       |
| 23.07°   | Onda sinusoidal de 4 Hz, amplitud de 4 mm.                 | 0.08                  |
|  | Onda sinusoidal tipo “chirp” con amplitud inicial de 4 mm. |                       |
|  | Sismo de Northridge  |                       |
| 34.56°   | Onda sinusoidal de 4 Hz, amplitud de 4 mm.                 | 0.0944                |
|  | Onda sinusoidal tipo “chirp” con amplitud inicial de 4 mm. |                       |
| 43.55°   | Onda sinusoidal de 4 Hz, amplitud de 4 mm.                 | 0.1193                |
|  | Onda sinusoidal tipo “chirp” con amplitud inicial de 4 mm. |                       |
|  | Sismo de Northridge  |                       |

Los ángulos de sesgo experimentales son calculados con una simple relación trigonométrica con la longitud de la línea que une la cámara con el blanco (la hipotenusa) y la otra longitud que correspondería a cualquier de los catetos sea en el sentido vertical (ángulos en el plano vertical) o en el sentido horizontal (ángulos en el plano horizontal). A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de las frecuencias para estudiar el efecto de la alineación sesgada.

### 3.3.1 Resultados para el ángulo de sesgo vertical de $12.9^\circ$

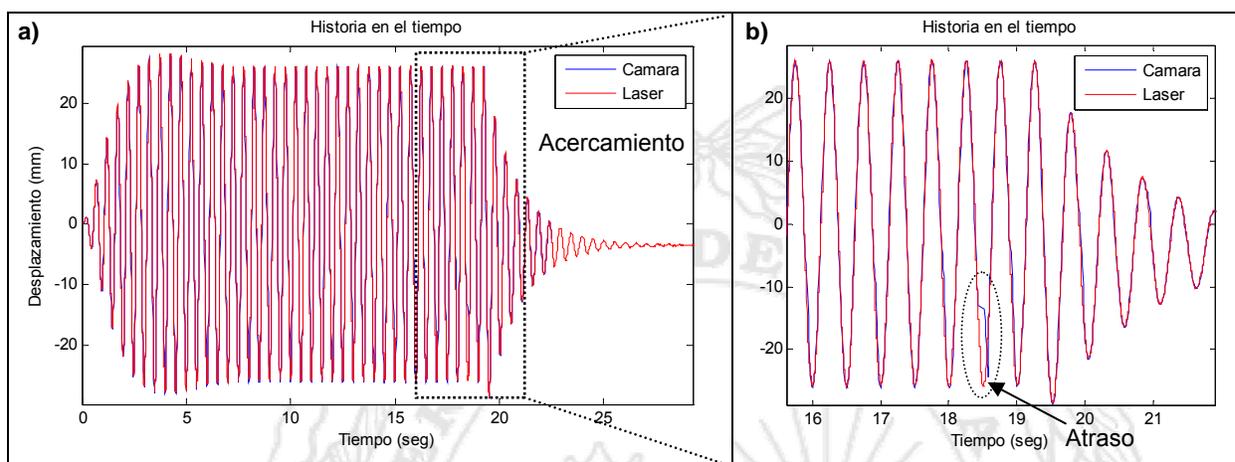


**Figura 27.** Comparación para una onda sinusoidal de frecuencia variable “Chirp” con amplitud de 4 mm: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.

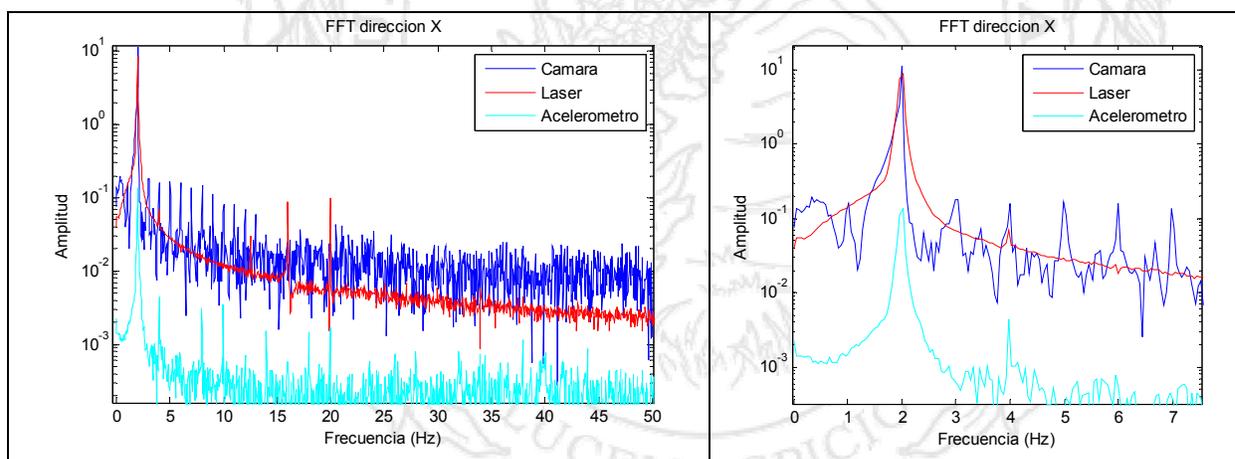


**Figura 28.** Comparación para el registro sísmico Northridge: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.

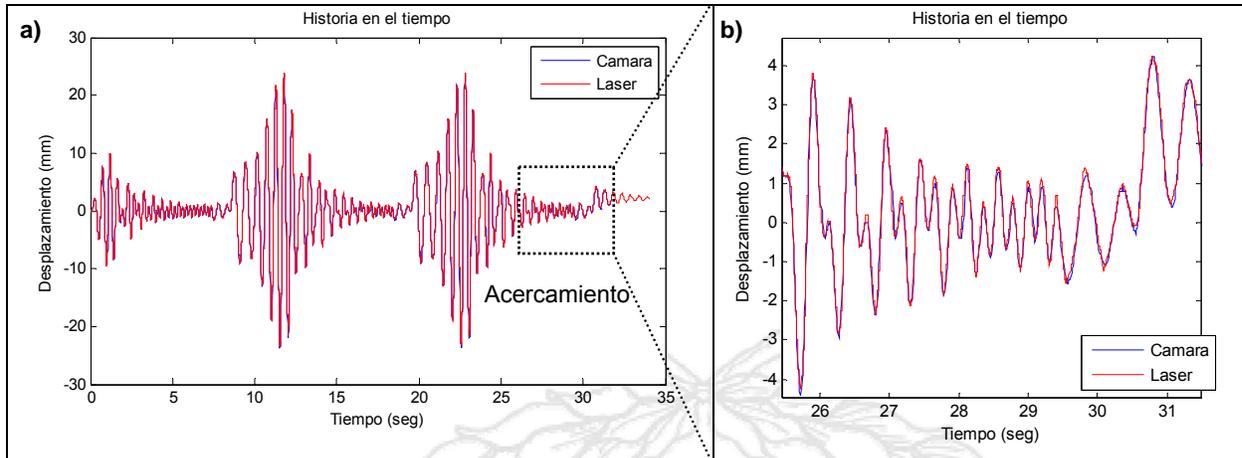
3.3.2 Resultados para el ángulo de sesgo vertical de  $30.16^\circ$



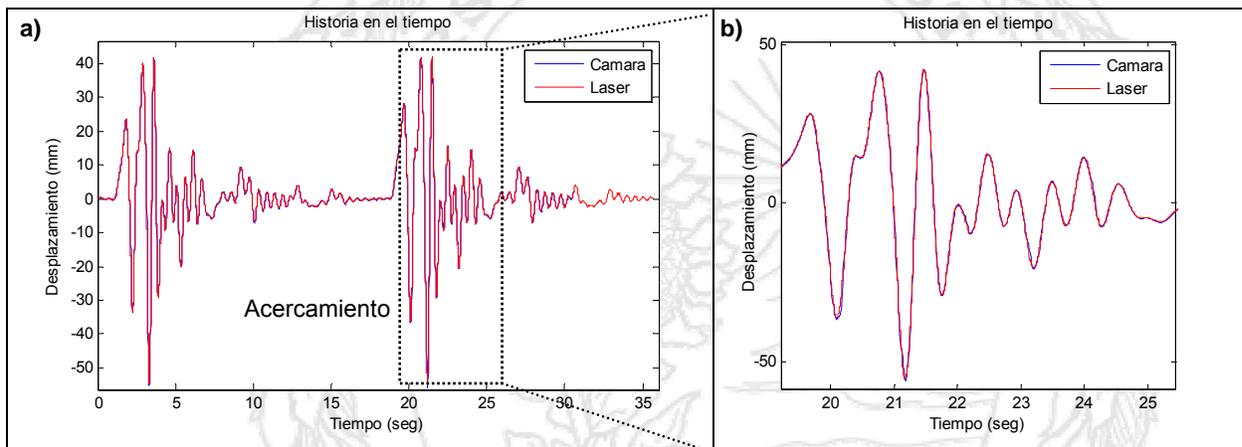
**Figura 29.** Comparación para una onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.



**Figura 30.** Transformada de Fourier de los resultados con onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm: a) mostrado hasta la frecuencia de Nyquist, b) acercamiento al pico.



**Figura 31.** Comparación para una onda sinusoidal de frecuencia variable “Chirp” con amplitud de 4 mm: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.

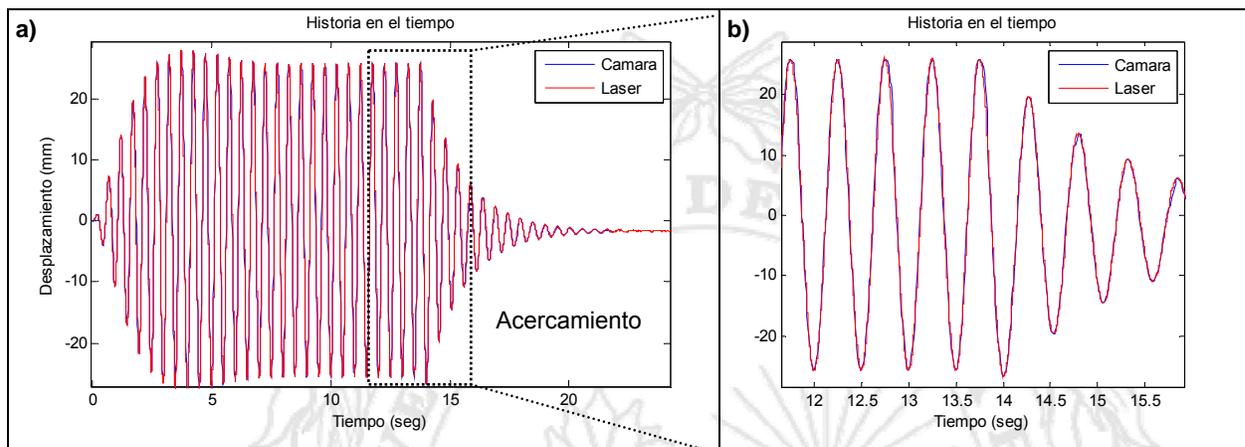


**Figura 32.** Comparación para el registro sísmico Northridge: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.

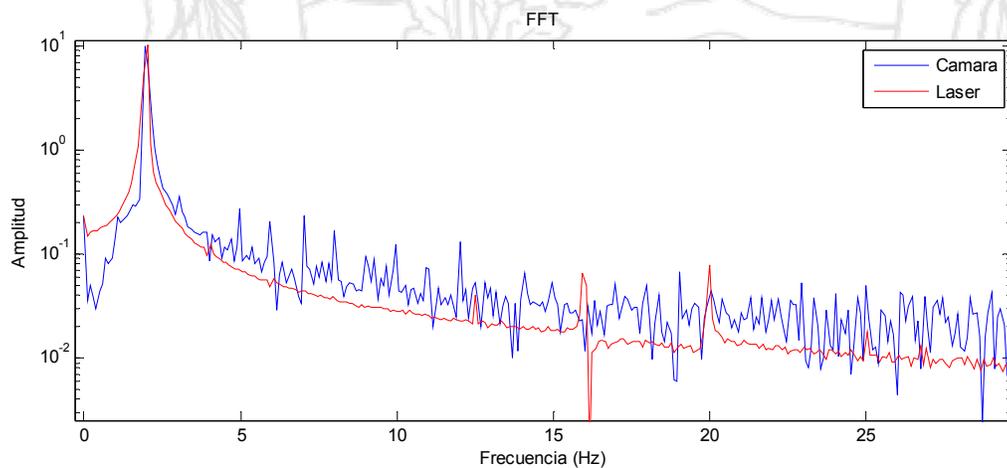
Con base en los resultados mostrados desde la Figura 27 hasta la Figura 32 se concluye que los ángulos de sesgo vertical no tienen ninguna influencia en la calidad de rastreo, y se puede notar que las formas de onda medidas son casi totalmente idénticas a las captadas por el láser. Tanto los cambios drásticos en la amplitud de un extremo a otro, tal como se muestran en los resultados generados por el sismo de Northridge, así como en los tramos de

amplitudes bajas y de alta frecuencia como se muestran en los acercamientos a las ondas “Chirp”, ambos fueron bien captados por la cámara y los errores son insignificantes.

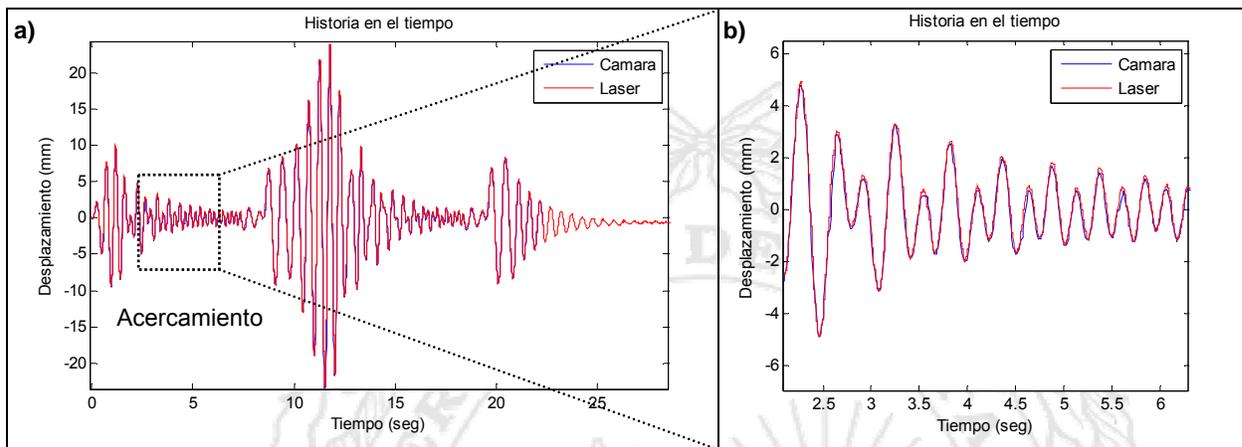
### 3.3.3 Resultados para el ángulo de sesgo horizontal de $23.07^\circ$



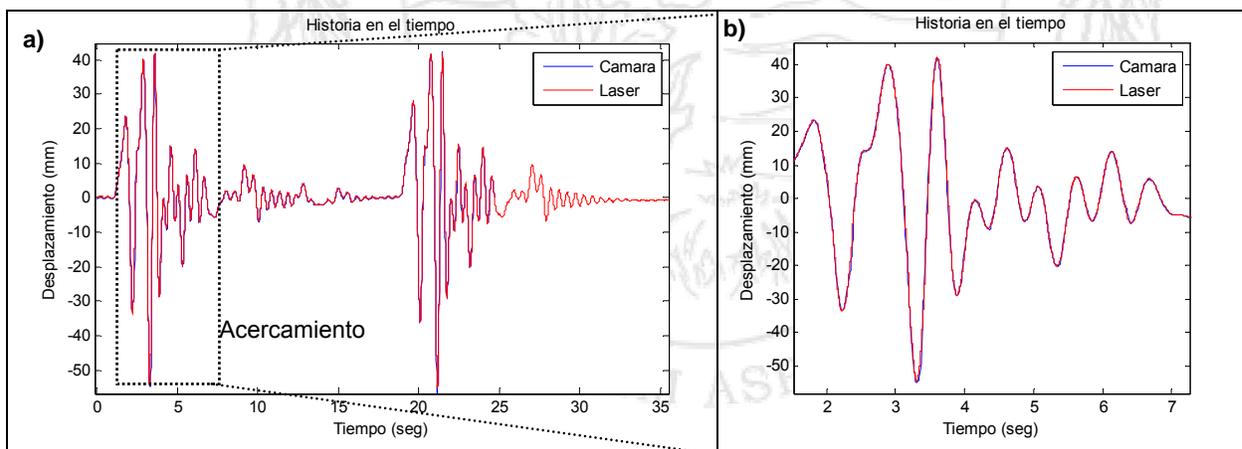
**Figura 33.** Comparación para una onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.



**Figura 34.** Transformada de Fourier de los resultados con onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm.

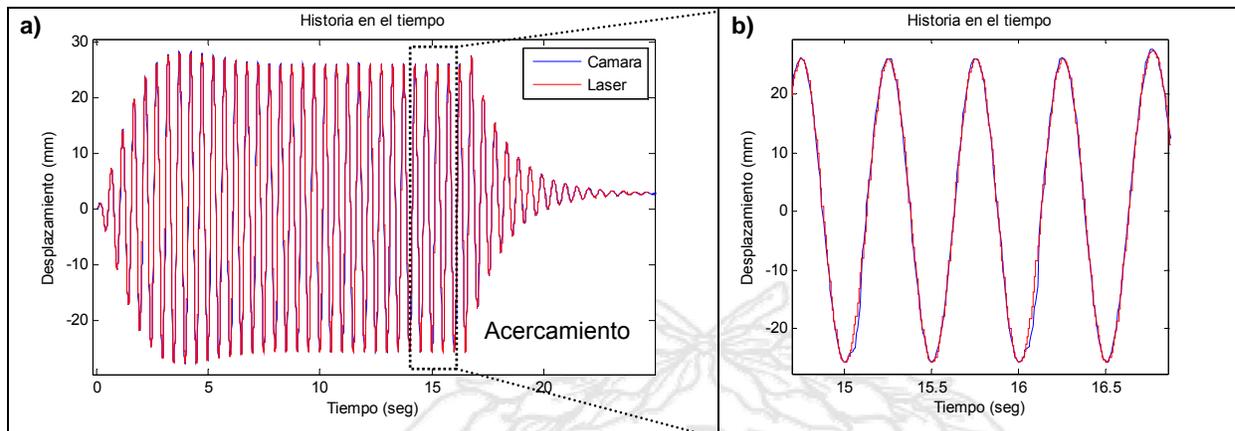


**Figura 35.** Comparación para una onda sinusoidal de frecuencia variable “Chirp” con amplitud de 4 mm: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.

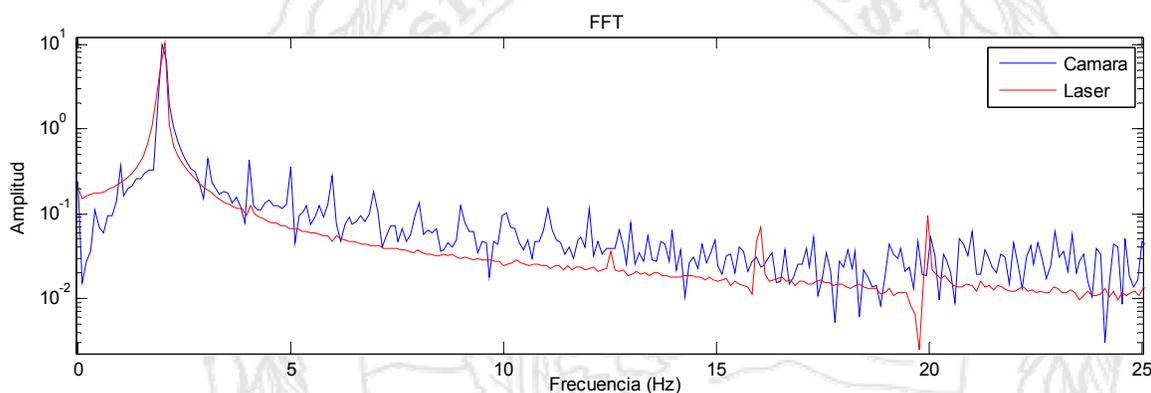


**Figura 36.** Comparación para el registro sísmico Northridge: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.

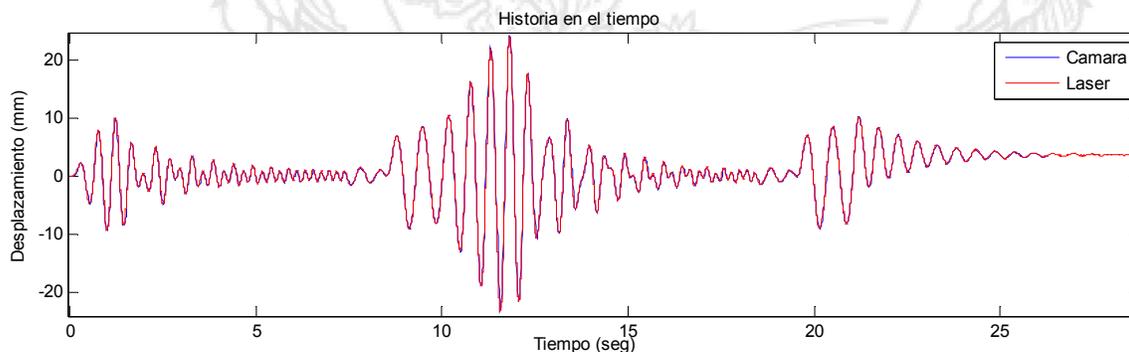
### 3.3.4 Resultados para el ángulo de sesgo horizontal de $34.56^\circ$



**Figura 37.** Comparación para una onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.

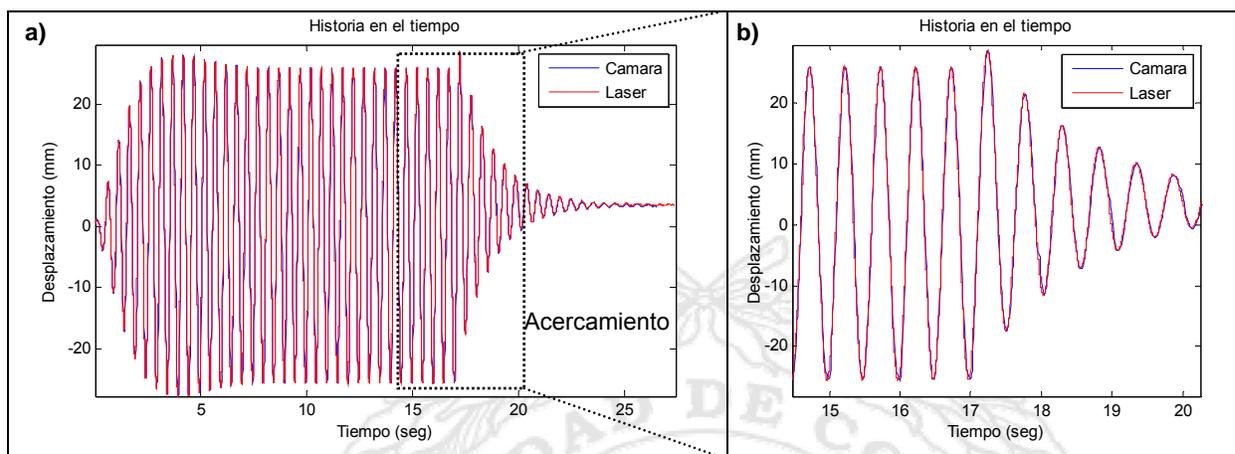


**Figura 38.** Transformada de Fourier de los resultados con onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm.

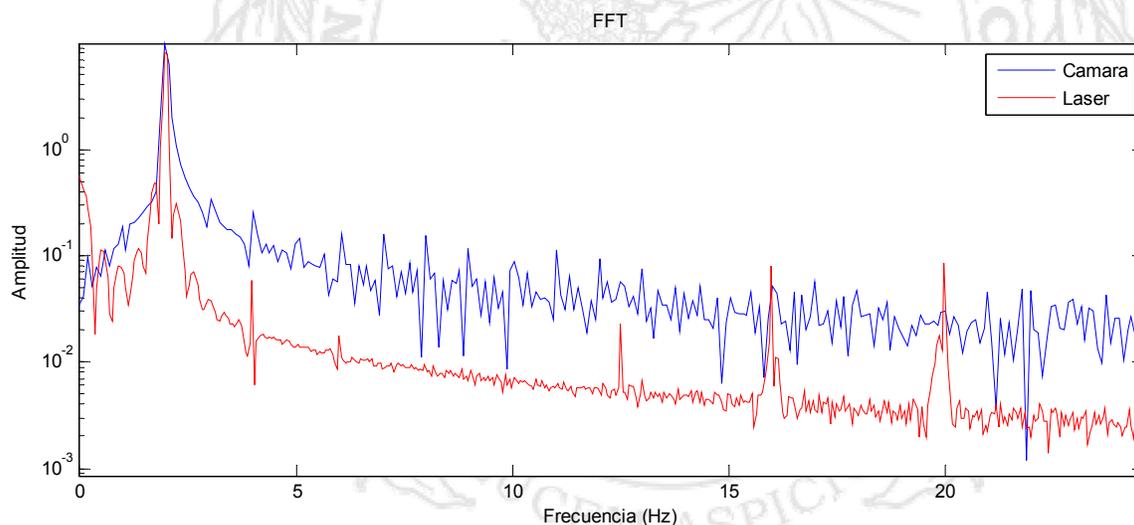


**Figura 39.** Comparación para una onda sinusoidal de frecuencia variable "Chirp" con amplitud de 4 mm.

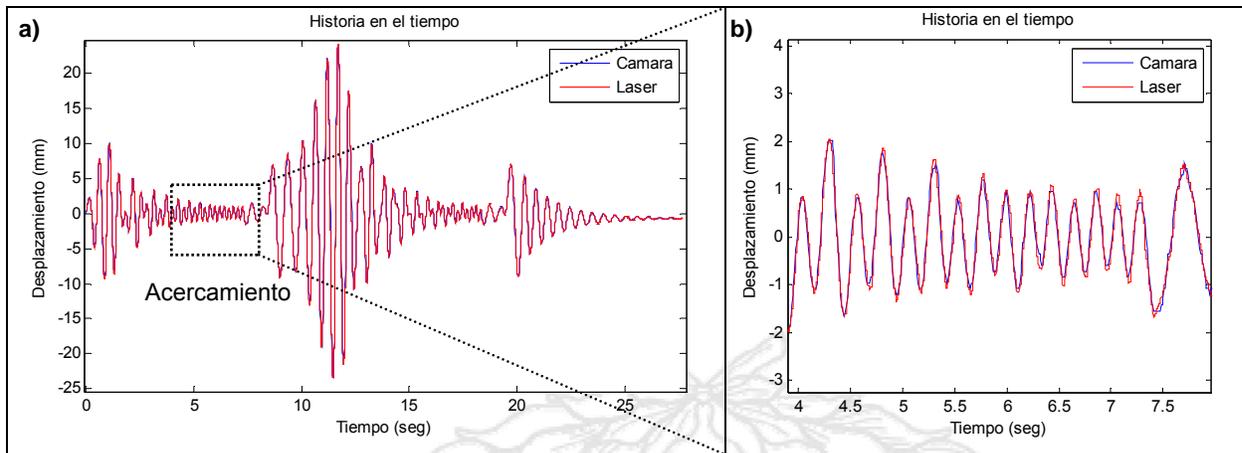
### 3.3.5 Resultados para el ángulo de sesgo horizontal de $43.55^\circ$



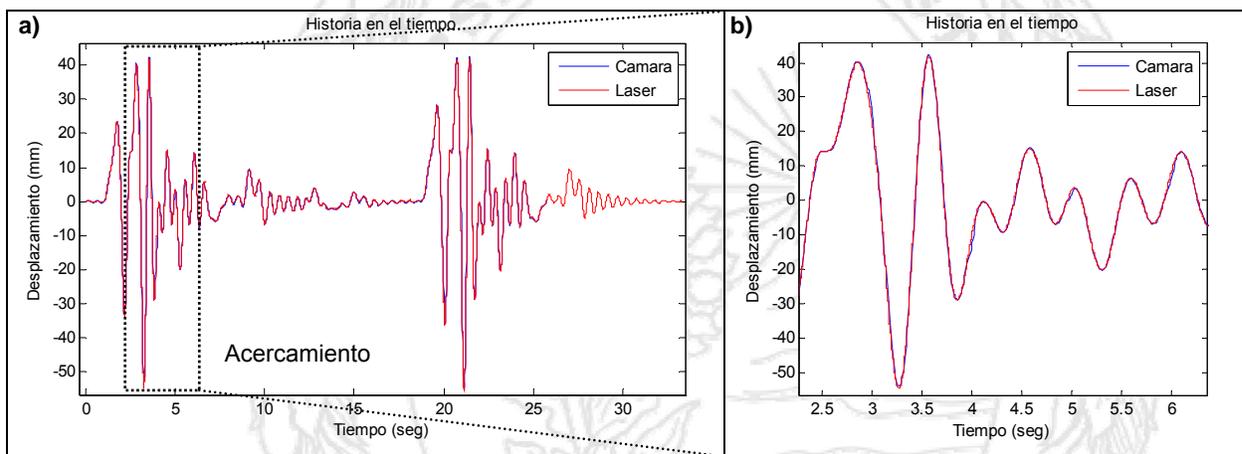
**Figura 40.** Comparación para una onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.



**Figura 41.** Transformada de Fourier de los resultados con onda sinusoidal de 2 Hz con amplitud de 4 mm.



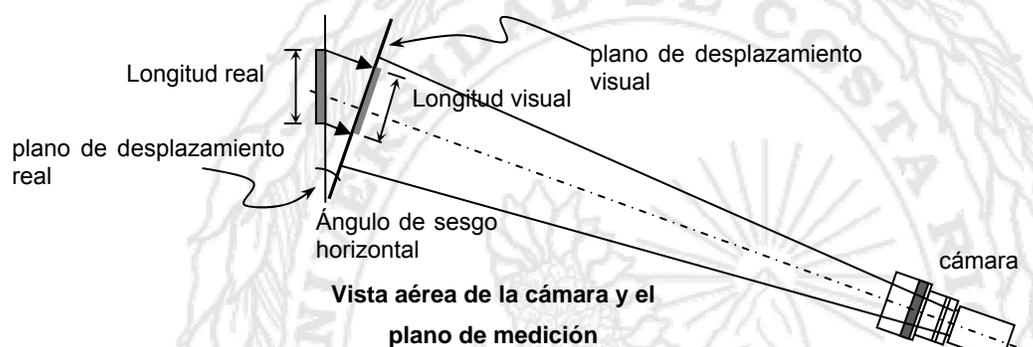
**Figura 42.** Comparación para una onda sinusoidal de frecuencia variable “Chirp” con amplitud de 4 mm: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.



**Figura 43.** Comparación para el registro sísmico Northridge: a) toda la historia en el tiempo b) acercamiento a un tramo.

De los resultados para el caso de ángulos sesgados en el plano horizontal, se puede concluir que el efecto de la perspectiva no influye en la medición, aún para un ángulo de sesgo cercano a  $45^\circ$ , a pesar de que la cámara ya no es perpendicular a la dirección del movimiento. Esto probablemente se debe a que la cámara está enfocada a un área sumamente pequeña y los desplazamientos también son pequeños, donde el efecto de la perspectiva es mínima, además del hecho que la dirección del movimiento junto a la línea de referencia (donde se calcular la escala de conversión) debe ser especificada antes de iniciar

el rastreo, de forma que, aunque se viera inclinada la línea horizontal en la imagen captada, los movimientos en píxeles en “x” y en “y” de la imagen pueden ser transformados y rotados a la dirección correcta. Por otro lado, como se puede observar en la Tabla 4, conforme se aumenta el ángulo de sesgo horizontal, el factor de conversión en mm/píxel también aumenta (la resolución disminuye), esto se debe a que el plano real de medición de la cámara sigue siendo un plano perpendicular a la cámara, los desplazamientos del blanco en el plano sesgado son captados como una proyección en este plano perpendicular, por lo que se cuenta con una menor resolución (o menos píxeles para discretizar una misma longitud). Esto se ilustra en la Figura 44.



**Figura 44.** Plano visual de la cámara en caso de enfocarse un área muy pequeña con el efecto de la perspectiva despreciable.

Por último, se puede comentar que los errores que se observan en los picos de amplitudes menores (alrededor de 1 mm) corresponden ya al límite de resolución para cada caso (alrededor de 0.1 mm).

Con todas estas pruebas de laboratorio realizadas, la aplicación del método de procesamiento de imágenes tanto del lado del algoritmo propuesto como del lado del sistema físico quedó completamente validado y pueden ser empleados para propósitos de medición en ingeniería civil.

#### 4. VALIDACIÓN EN CAMPO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Después de ser validado en laboratorio la aplicación de la cámara digital como la herramienta idónea para la medición de desplazamientos, así como el algoritmo propuesto para el rastreo del objetivo en tiempo real, se prosigue a validar el sistema mediante pruebas de campo, donde las variables no controlables como la luz ambiental, perturbaciones atmosféricas del aire, vibraciones en el lente teleobjetivo y cámara causadas por el viento, así como las limitaciones propias del sistema como la aberración en sistemas ópticos, capacidad de la cámara digital para adaptarse a diferentes condiciones ambientales, la longitud focal y nitidez del enfoque de la lente teleobjetivo para enfocarse en un área sumamente pequeña a larga distancia, deben ser validadas y evaluadas. Esto con el fin de garantizar la aplicabilidad del sistema en los quehaceres de monitoreo de puentes, también permite conocer el alcance y las limitaciones del sistema.

A diferencia de la validación en laboratorio, las distancias de medición en campo son mayores, en el rango de unas decenas de metros para puentes menores y medianos, hasta centenares de metros para puentes largos. Es posible, en condiciones de laboratorio, utilizar un simple punto blanco sobre un fondo oscuro tal como se mostró en Figura 20 a) para realizar el rastreo; por el contrario, para las distancias de trabajo de campo, el blanco tiene que ser una fuente luminosa como una luz LED o un foco para poder ser visto a través de la cámara y lente a larga distancia. La imagen presentada en Figura 10 muestra como se ve la luz LED, emitida a través de un orificio de una caja negra, en la cámara que se encontraba a unos 100 m de distancia aproximadamente.

Además de la necesidad de una fuente de luz, un lente super-teleobjetivo de gran longitud focal es necesario para que la cámara pueda captar la imagen en un área sumamente reducida y a larga distancia. Tal como lo mencionado en sección 2.2 y mostrado en Figura 7, se puede apreciar la cantidad de accesorios como el trípode robusto, el soporte tipo cardán y el brazo extensible que sirve de soporte extra para lentes largos, los cuales son indispensables para reducir la vibración del sistema en presencia del viento; pues,

preliminarmente se ha hecho pruebas en campo usando el trípode liviano mostrado en la Figura 25, y empotrando directamente la lente teleobjetivo en el trípode. Sin embargo, una medición confiable es inviable ante la vibración inducida por el viento en esta primera configuración, razón por la cual se diseñó el sistema robusto descrito previamente y mostrado en la Figura 7.

Dada la dificultad para instalar sistemas de medición tradicional que sirva de referencia como láser, el LVDT (Linear Variable Displacement Transducer, en inglés) o cualquier extensómetro para medir la deflexión vertical dinámica en un puente, se propuso trasladar la mesa vibratoria al campo para realizar la primera validación, posibilitando así realizar pruebas más controladas que permiten conocer mejor el desempeño de la configuración propuesta, con especial atención en el lente teleobjetivo. Luego, escoger un puente en menor escala preferiblemente dentro del campus de la Universidad de Costa Rica, para tener ambientes más seguros, donde es factible instalar el sistema de medición de referencia, y así validar el sistema en un puente propiamente.

Estos dos trabajos de validación en campo se describirán a continuación.

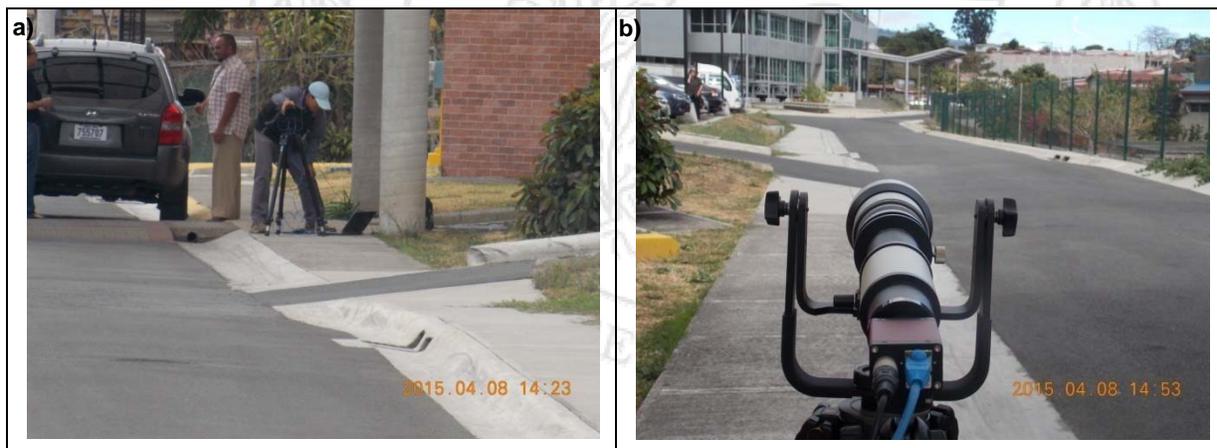
#### **4.1 Validación en campo mediante el uso de la mesa vibratoria.**

Para conocer en detalle el desempeño del sistema a larga distancia, así como el efecto de las vibraciones inducidas por el viento en la lente teleobjetivo dada su forma tubular, se decidió trasladar tanto la mesa vibratoria como los equipos de medición de referencia y adquisición de datos de al aire libre, donde fueron instalados tomando de prestado el porche de la entrada al edificio de Educación Continua, ubicado en la finca 2 del campus de la Universidad de Costa Rica. Esto es posible gracias a que hasta la fecha de la prueba el edificio no ha sido inaugurado aún. La instalación de los equipos se muestra en la Figura 45. La razón de la escogencia de este lugar se debe a la disponibilidad de una fuente de energía eléctrica, así como un techo que brinda protección a los equipos ante una eventual lluvia.

Por otro lado, el sistema de medición basado en la visión se ubicó en el edificio de Centro de Transferencia de Tecnología, sobre el pasillo frente a la entrada al auditorio, tal como se muestra en la Figura 46.



**Figura 45.** Instalación de los equipos para la prueba de validación.



**Figura 46.** Instalación del sistema de medición basado en la visión en validación, a) vista desde la mesa vibratoria, b) como se ve desde la cámara hacia la mesa vibratoria.

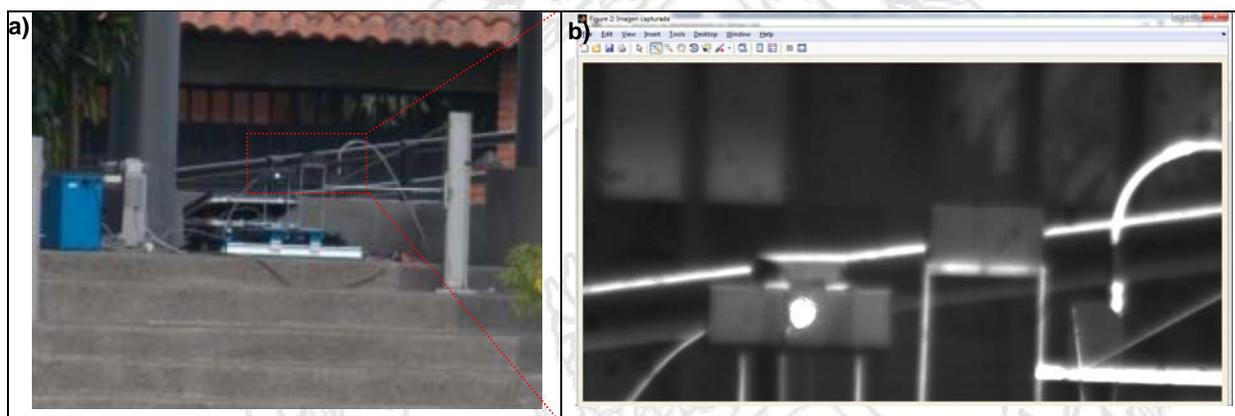
Se pretende evaluar el desempeño del sistema de medición propuesto a su máximo alcance, es decir, utilizando la máxima longitud focal disponible en la lente teleobjetivo así como su capacidad para enfocarse; la distancia que hay entre el objetivo a rastrear sobre la mesa vibratoria y la cámara son unos 113 metros, la cual es una distancia de medición representativa para puentes de mediano tamaño. Como se puede apreciar en la Figura 47, a la cámara casi ni se logra apreciar en la fotografía tomada debido a la larga distancia.



**Figura 47.** Distancia que existe entre la cámara y el objetivo a rastrear.

Para esta distancia, la Figura 48 a) muestra como se ve el objetivo a rastrear tomado desde una cámara digital normal a color, y en b) se muestra como se ve el mismo en la cámara utilizando toda la capacidad de enfoque, sin embargo, no se ha alcanzado aún a la máxima longitud focal disponible en la cámara. Esto tiene que ver propiamente con el diseño del lente comercial, pues, ya se ha llegado al límite del “enfocador” del lente, lo que no permite al lente

enfocarse aunque se pudiera aumentar más la longitud focal (a mayor longitud focal, más magnificación o acercamiento se obtiene). El hecho de no poder acercarse más al objetivo implica la pérdida de la resolución en la medición y en caso de desplazamientos pequeños sencillamente es imperceptible para la cámara. En esta prueba de validación este no es el caso, pues, se puede generar desplazamientos hasta decenas de centímetros con la mesa vibratoria, sólo que este no es el caso de puentes de longitudes mayores a 100 m, porque los desplazamientos verticales en el centro de la luz libre de estos puentes son mucho menores, en el orden de unos cuantos centímetros solamente.



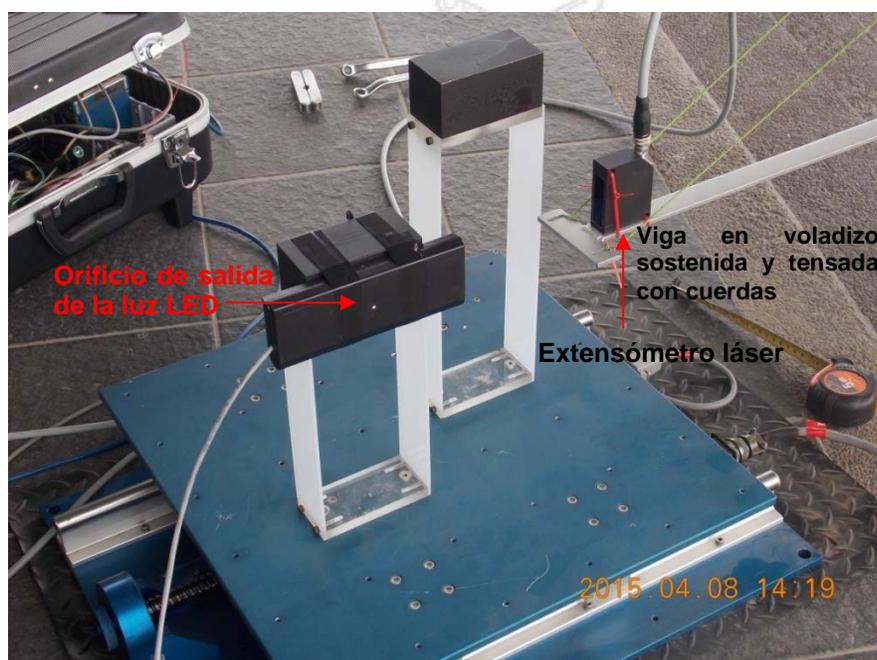
**Figura 48.** a) Fotografía sobre cómo se ve el objetivo desde la posición de la cámara de rastreo, b) como se observa el objetivo desde la cámara de rastreo.

En esta prueba de validación se utilizó se utilizó un sensor láser de la marca Microepsilon mucho más pequeño y portátil que el extensómetro láser utilizado en laboratorio, facilitando el trabajo. Las especificaciones del extensómetro se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones del extensómetro láser de la marca Microepsilon

|                   |                           |
|-------------------|---------------------------|
| Serie             | optoNCDT 1302-20          |
| Dimensiones       | 80 x 65 x 20 mm           |
| Tasa de muestreo  | 750 Hz                    |
| Rango de medición | de 60 mm a 260 mm         |
| Resolución        | 0.004 mm (o 0.05% de FSO) |

El extensómetro láser es colocado sobre una viga de acero en voladizo empotrado sobre el poste de aluminio. Para evitar vibraciones verticales en la viga, se sostiene el extremo libre mediante una cuerda tensada que conecta la viga al tope del poste, tal como se ilustra en la Figura 49. Asimismo, se puede apreciar en la misma figura la caja negra atada al objetivo de rastreo, el cual tiene una luz LED instalada por dentro y cuenta con un orificio de salida para la luz, que funciona como el blanco de rastreo.

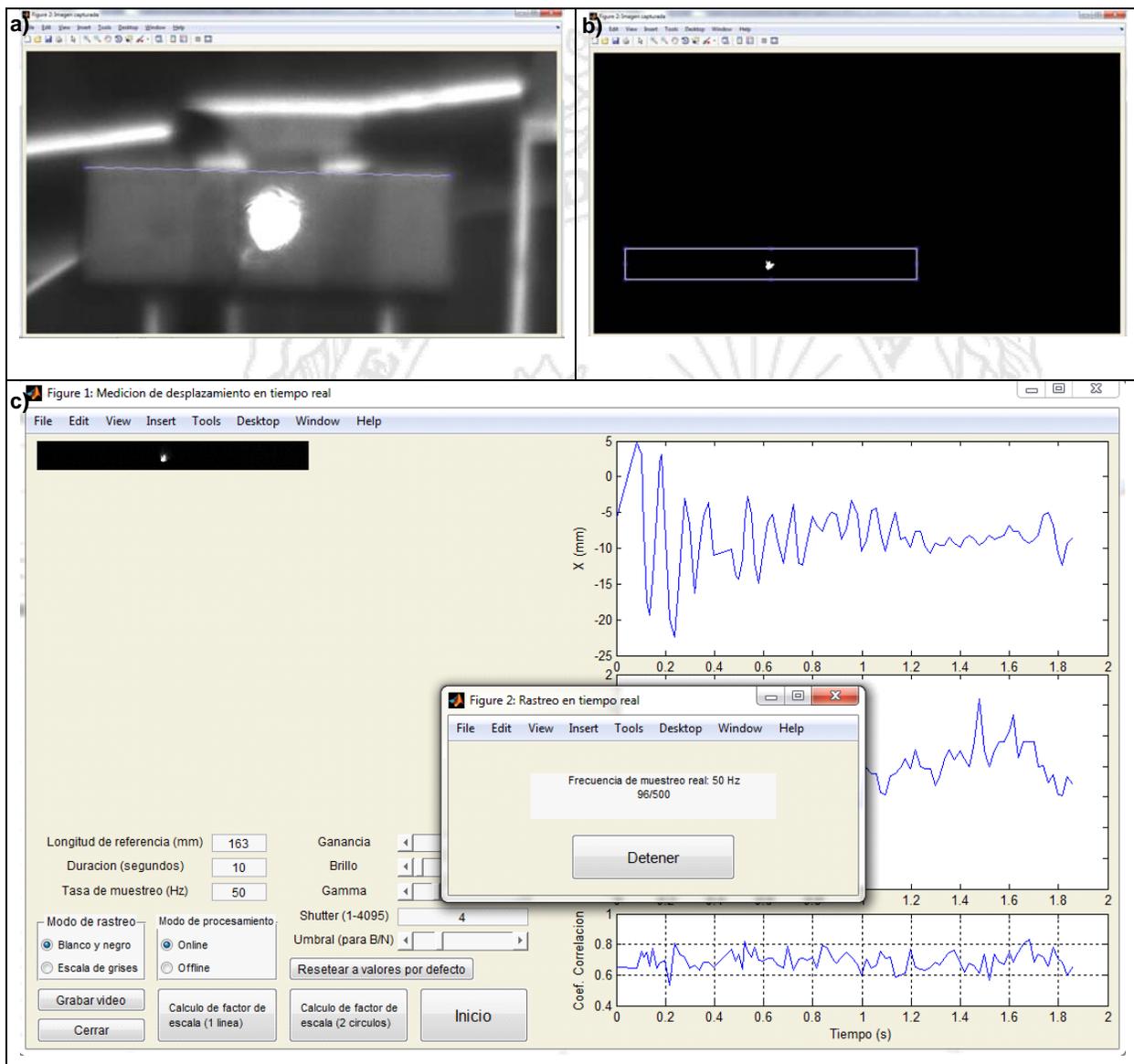


**Figura 49.** El sistema de fijación para el extensómetro láser y el blanco de rastreo con fuente de luz.

En la Figura 50 a) muestra como es el trazado de la longitud de referencia en el programa, b) es la definición de la región de interés (ROI) y c) es como se ve el blanco durante el rastreo en tiempo real. La escala de conversión mm/píxel obtenida a la distancia de 113 m con la máxima capacidad de enfoque del sistema es de unos 0.277 mm/píxel, la cual es suficiente para medir amplitudes de movimiento en el orden de decenas de centímetros pero sería impreciso si se tratara de movimientos en el orden de milímetros. Es importante notar que la fuente de luz se ve muy difusa cuando se trazaba la longitud de referencia en a), esto se



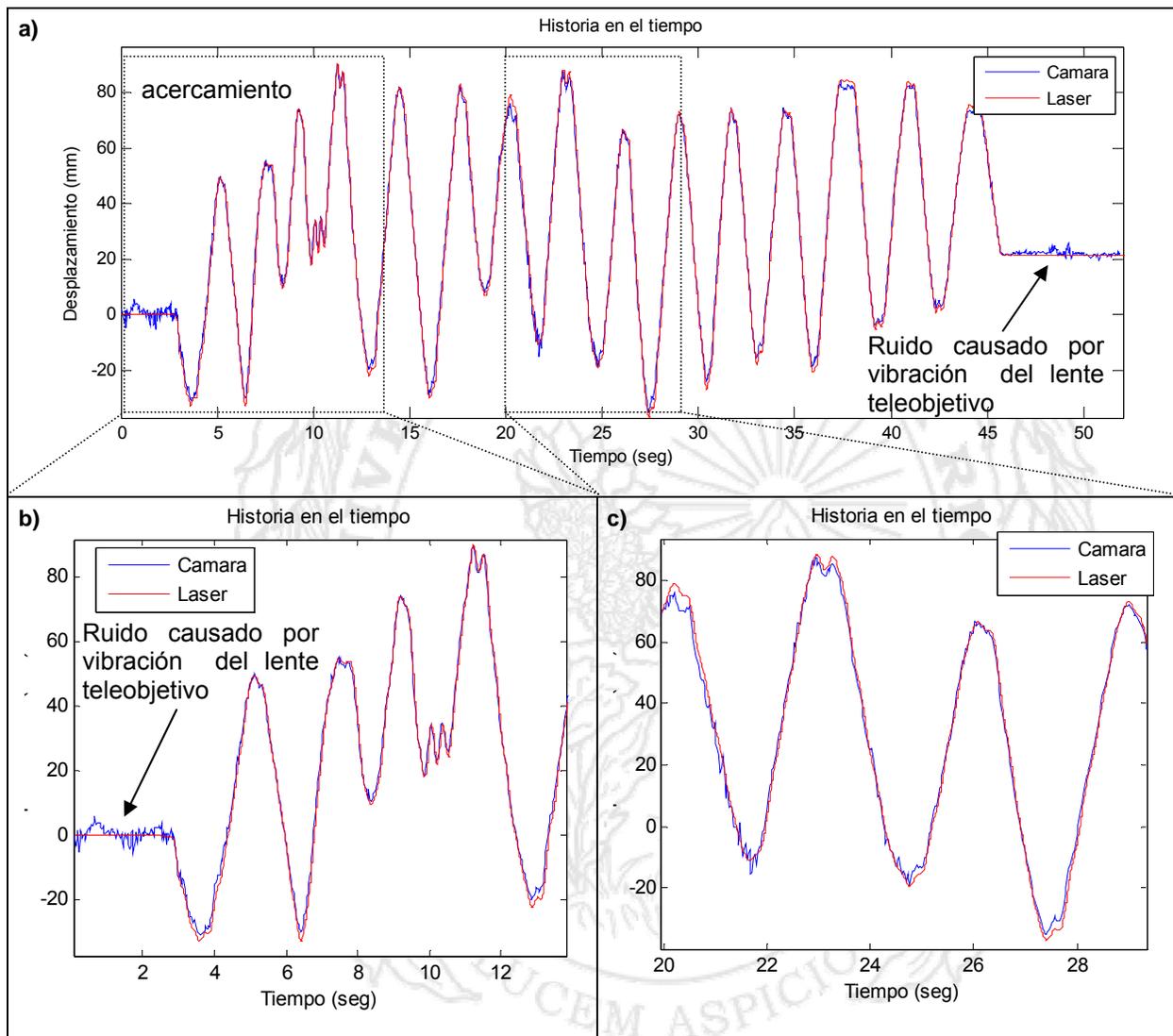
debe a que el tiempo de exposición es de unos 4000  $\mu\text{s}$ , mientras que durante el rastreo se reduce a unos 20  $\mu\text{s}$ , con el que se ve sólo un punto blanco en la imagen. Por otro lado, se puede notar que para un tiempo de exposición de 20  $\mu\text{s}$ , la fuente de luz no es circular como se esperaba, esto probablemente se debe a la imperfección en el borde del orificio perforado. Más adelante se presentarán los resultados de las pruebas de validación.



**Figura 50.** a) El trazado de la longitud de referencia, b) la definición de la región de interés (ROI) y c) como se ve el blanco durante el rastreo en tiempo real.

#### 4.1.1 Prueba con desplazamientos aleatorios generados vía manual

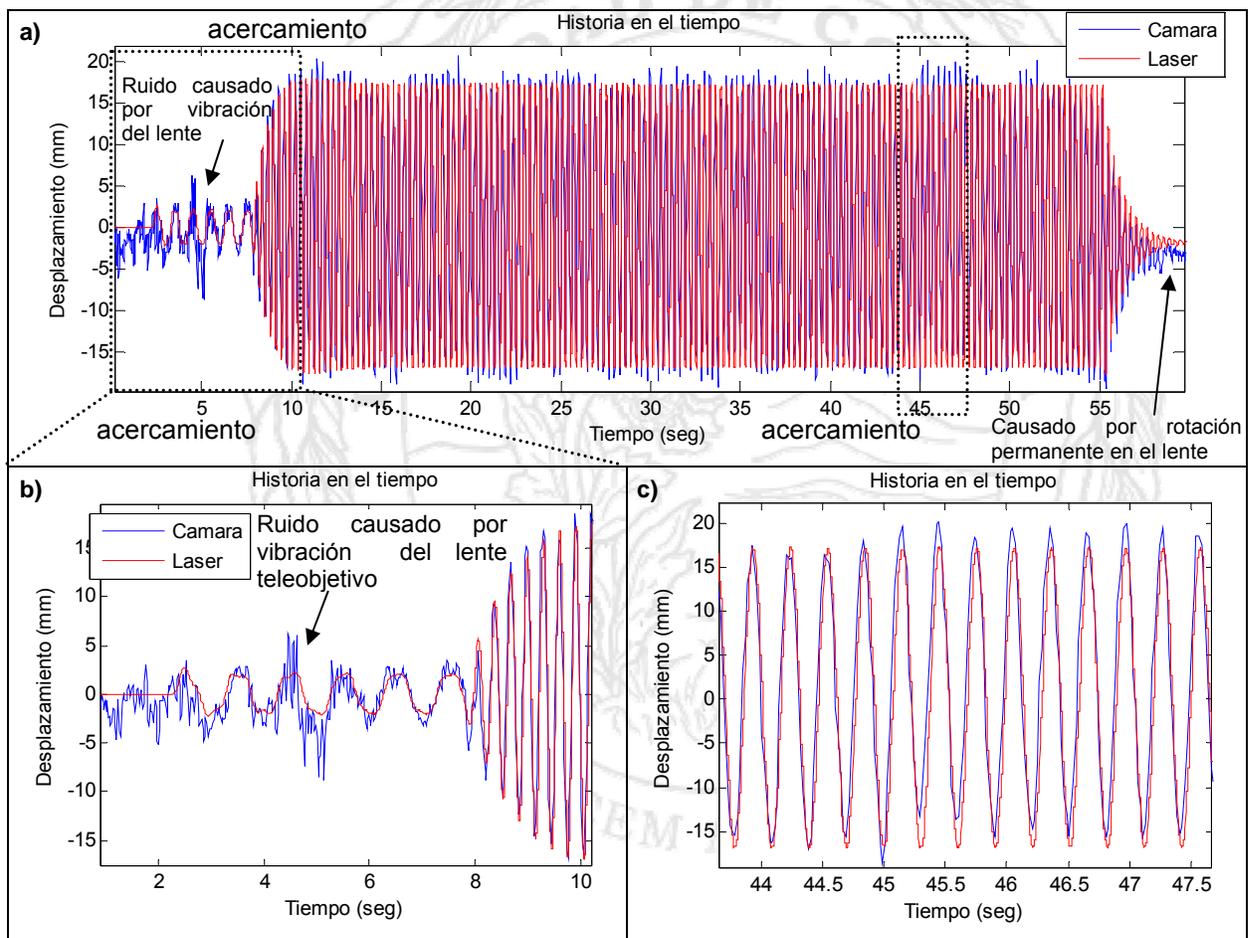
El resultado de medición de desplazamientos para movimientos generados vía manual es mostrado en la Figura 51.



**Figura 51.** a) La historia de desplazamiento en el tiempo del movimiento aleatorio generado manualmente, b) acercamiento a los tiempos iniciales y c) acercamiento a un tramo intermedio.

Se puede observar en la Figura 51 a) que aún a una distancia de 113 m, los desplazamientos fueron correctamente rastreados, sin embargo, como se aprecia en los primeros minutos y en los últimos, donde el objetivo está en total reposo pero la cámara registraba unas vibraciones de amplitud baja y de alta frecuencia. Se trata del ruido provocado por la vibración del lente teleobjetivo inducido por el viento, aberración y la distorsión atmosférica de la fuente de luz, que está en el orden de 5 mm. Al tener en esta prueba un factor de conversión de 0.277 mm/píxel, correspondería a unos 18 píxeles aproximadamente.

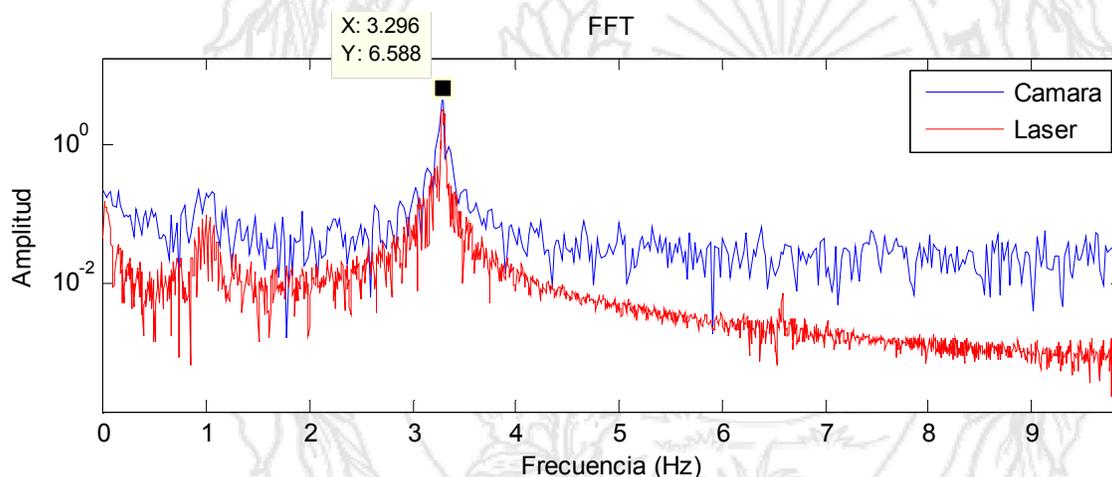
#### 4.1.2 Prueba con sinusoidales



**Figura 52.** a) La historia de desplazamiento en el tiempo del sinusoidal, b) acercamiento a los tiempos iniciales y c) acercamiento a un tramo intermedio.

Se puede observar en la Figura 52 el ruido que introduce la vibración por el viento, aberración óptica y distorsiones atmosféricas a la luz, en la medición de un sinusoidal de 3.3 Hz. Esto hace que la amplitud medida por la cámara tenga desviación respecto a la medición de láser. Otro problema que se observa es la rotación en el plano horizontal que sufre el soporte tipo cardán debido a la vibración del viento o al desbalance del peso del lente teleobjetivo por su gran longitud. Esto porque el soporte controla la rotación en el plano horizontal mediante la fricción entre superficies, no obstante, esta fricción parece ser insuficiente para proveer resistencia contra la rotación provocada por el viento o el desbalance del peso propio.

En la Figura 53 se puede observar el espectro de Fourier obtenido de las mediciones del extensómetro láser y de la cámara. Ambos concuerdan en el pico máximo de 3.3 Hz, lo que significa que la información dinámica no es afectada por el ruido.

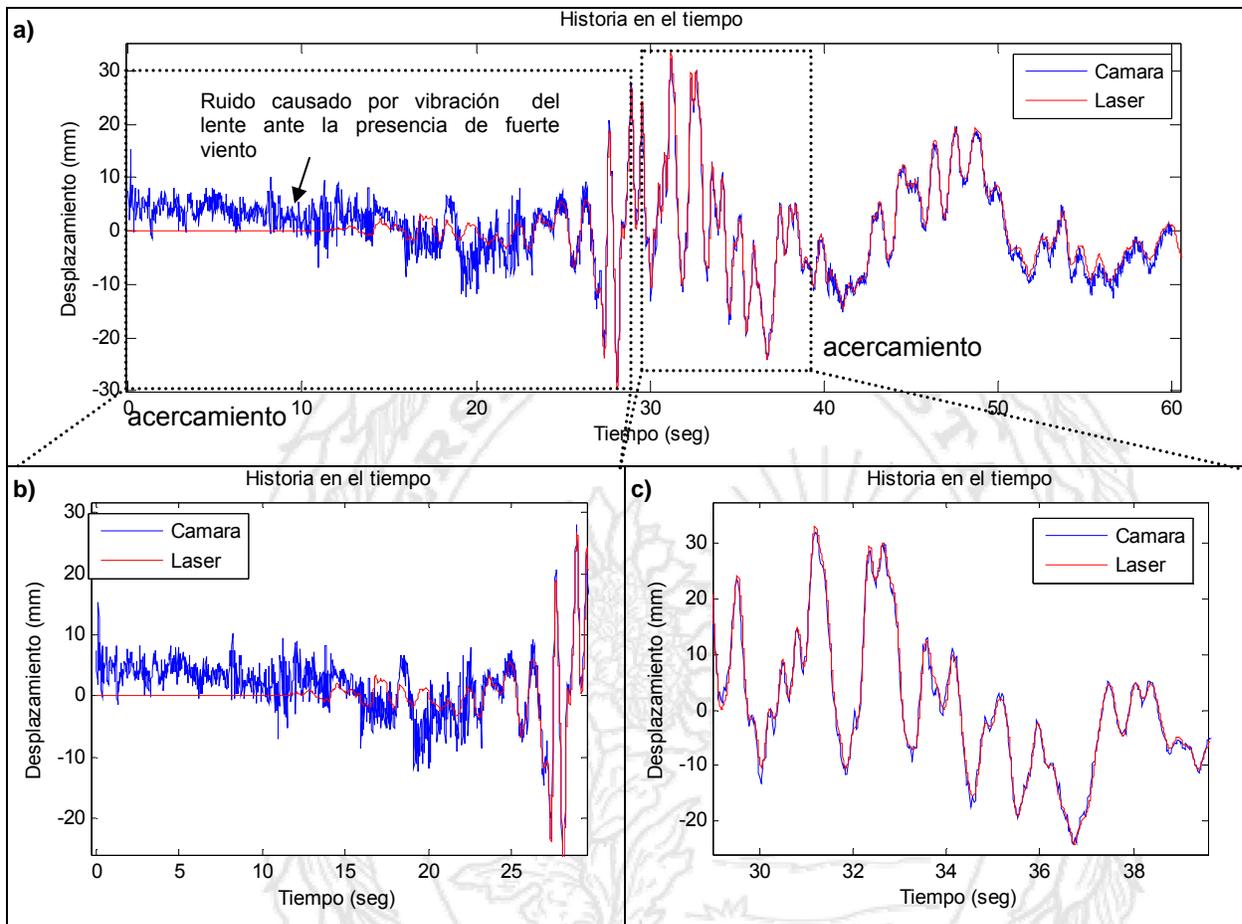


**Figura 53.** Transformada Rápida de Fourier de las mediciones de láser y de la cámara.

#### 4.1.3 Prueba con el sismo de Kobe

Durante la realización de la prueba con el registro del sismo de Kobe (Japón, 1995) simulado en la mesa vibratoria, se percibió un fuerte viento previo al inicio del evento, el cual causó fuertes vibraciones horizontales en el lente teleobjetivo y fue registrado en la historia de

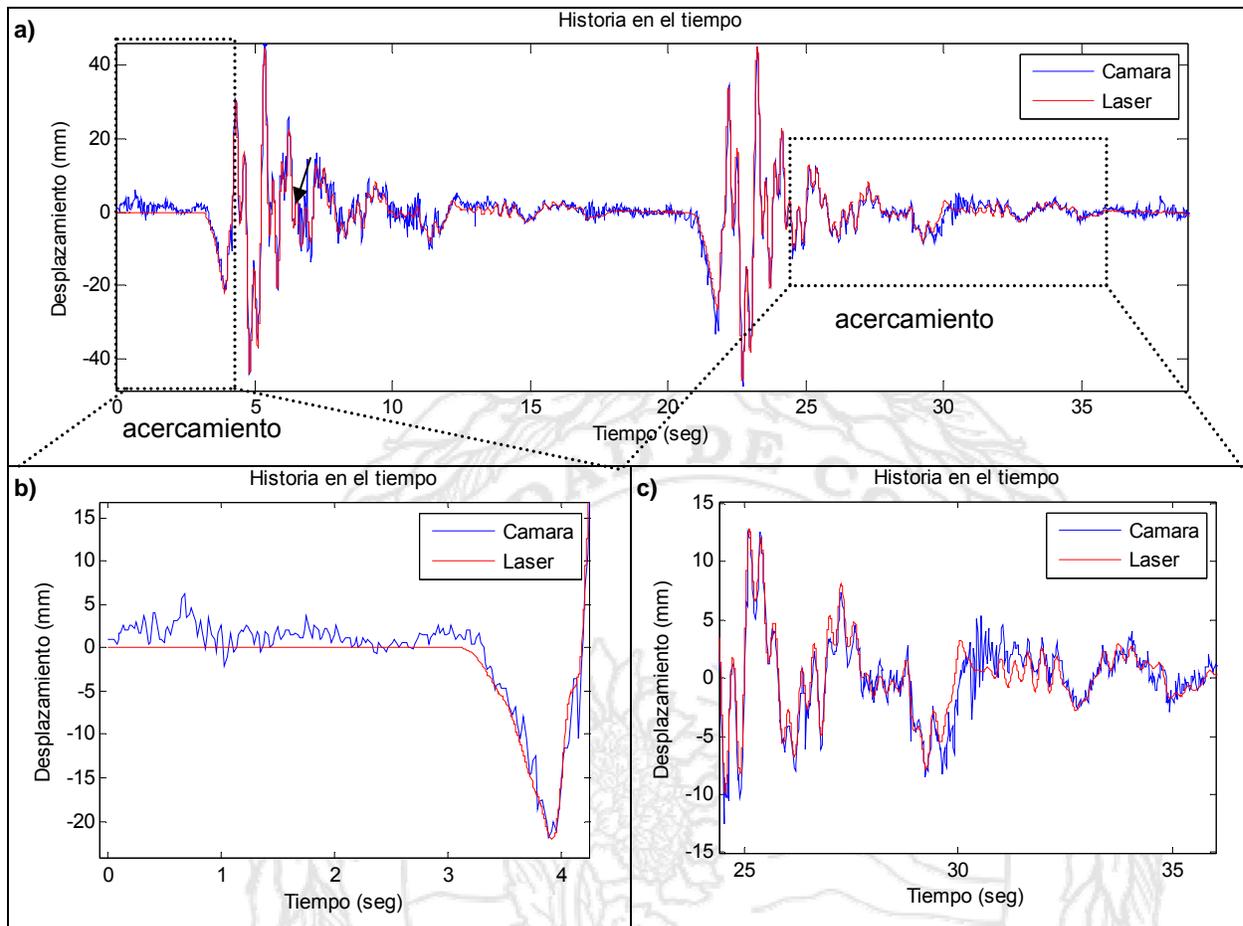
desplazamiento en el tiempo como un ruido de un nivel mayor, pocos segundos después del inicio del evento sísmico, el viento se debilitó y fue posible rastrear correctamente el movimiento del objetivo de rastreo.



**Figura 54.** a) La historia de desplazamiento en el tiempo ante el evento sísmico simulado de Kobe, b) acercamiento a los tiempos iniciales y c) acercamiento a un tramo intermedio.

#### 4.1.4 Prueba con el sismo de Northridge

La última prueba conducida con la mesa vibratoria en campo se trata de la simulación del sismo de Northridge. Los resultados se muestrean en la Figura 55.



**Figura 55.** a) La historia de desplazamiento en el tiempo ante el evento sísmico simulado de Northridge, b) acercamiento a los tiempos iniciales y c) acercamiento a un tramo intermedio.

Igual que los casos anteriores, se puede observar ruido causado por vientos de moderada intensidad, en el orden de unos 5 mm máximo en los primeros segundos de la prueba, el cual también perturbó la medición para amplitudes bajas de desplazamiento como lo mostrado en Figura 55 c); pero para amplitudes mayores de desplazamiento, la medición no fue afectada debido a la mayor razón señal/ruido.

Hasta este punto se presentaron los resultados de la validación en campo dando énfasis a la capacidad y precisión de rastreo en tiempo real del sistema óptico propuesto, para

desplazamientos en dirección horizontal, utilizando la mesa vibratoria. Los resultados mostraron que el sistema es capaz de medir desplazamientos correctamente aún a una distancia mayor a los 100 m, para amplitudes mayores de movimiento en el orden de decenas de milímetros.

Es importante señalar que siempre hubo presencia de viento durante las pruebas realizadas en campo con la mesa vibratoria. Durante la prueba con movimientos sinusoidales y la primera parte de la prueba con sismo de Kobe predomina un viento de muy alta intensidad, típico de los vientos alisios de la época seca en nuestro país, por lo que el ruido registrado ha llegado, inclusive, a unos 10 mm como máximo, el cual invalida totalmente las mediciones para amplitudes bajas de desplazamiento. En vientos de moderada a baja intensidad, el nivel del ruido registrado no llega a afectar la precisión de la medición para desplazamientos de mayor amplitud. El efecto del ruido es posible reducir a lo mínimo si se puede obtener una buena razón de señal/ruido, la que es posible alcanzar si se lograra adquirir un lente de aún mayor alcance y que tenga la capacidad para enfocarse en un área tanta pequeña, como el de un cuadrado de 10 x 10 cm, y a un centenar de metros de distancia.

Por otro lado, es importante comentar que la vibración del lente teleobjetivo inducida por el viento se da más que todo en mediciones de desplazamiento horizontal, debido a la insuficiente resistencia a fricción en el soporte tipo cardán, también a que la conexión del lente teleobjetivo al soporte no es suficientemente rígido como para evitar cualquier vibración. No obstante, este no es el caso para la medición de desplazamientos verticales, pues, en sentido vertical el lente teleobjetivo cuenta con un soporte extra conectado a la cámara, como lo mostrado en la Figura 7, el cual lo rigidiza totalmente en el plano vertical y reduce el efecto de vibración causado por el viento a lo mínimo.

Los resultados de la validación del sistema propuesto para medir en tiempo real el desplazamiento vertical de un punto, en un puente dado, se muestran en el siguiente apartado.

## 4.2 Validación en campo mediante el puente peatonal sobre la quebrada los Negritos dentro del campus de la UCR

Para validar la capacidad y exactitud de la medición del sistema óptico para los desplazamientos verticales de un punto del puente, se utilizó el puente peatonal sobre la quebrada los Negritos dentro del campus central de la UCR, el cual presenta un fácil acceso.

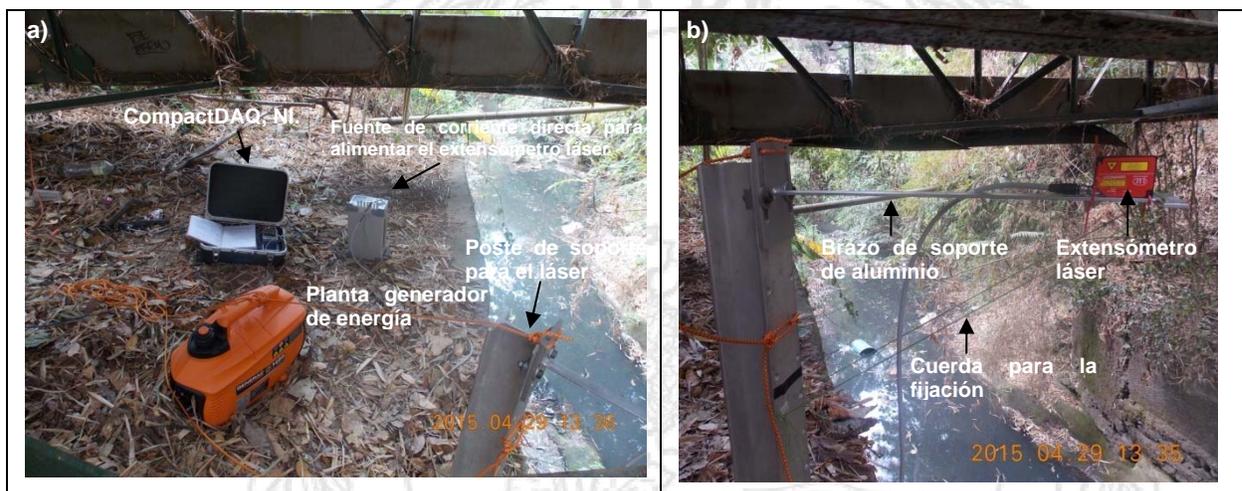
El puente peatonal se muestra en la Figura 56, se trata de dos cerchas metálica planas simplemente apoyadas, con una losa de concreto apoyada sobre sus cuerdas superiores. El puente comunica el edificio de estudios generales al edificio de química, tiene una luz muy corta (de unos 12 m de longitud) y es sumamente rígido para las cargas peatonales, por lo que se esperan que las deformaciones verticales sean sumamente pequeñas. Este hecho es beneficioso para la validación, pues, permite demostrar la exactitud de medición que el sistema óptico es capaz de alcanzar aún para desplazamientos menores presentes en puentes cortos y rígidos.



**Figura 56.** El puente peatonal sobre la quebrada de los Negritos en el campus central de la UCR.

Este puente fue elegido para el estudio de validación debido a su cercanía y comodidad, pero lo más importante es la seguridad que ofrece por encontrarse dentro del campus universitario y por tratarse de un puente peatonal.

La instalación del extensómetro láser así como los equipos para la adquisición de datos fue posible gracias a la existencia de un muro de retención y un terreno casi a la altura de la cuerda inferior de la cercha por uno de los apoyos del puente, el cual hace posible la instalación de los equipos de medición de referencia, tal como se muestra en la Figura 57.



**Figura 57.** a) Los equipos del sistema de adquisición de datos, b) detalle de fijación del extensómetro láser para la medición del desplazamiento vertical de un punto en el puente.

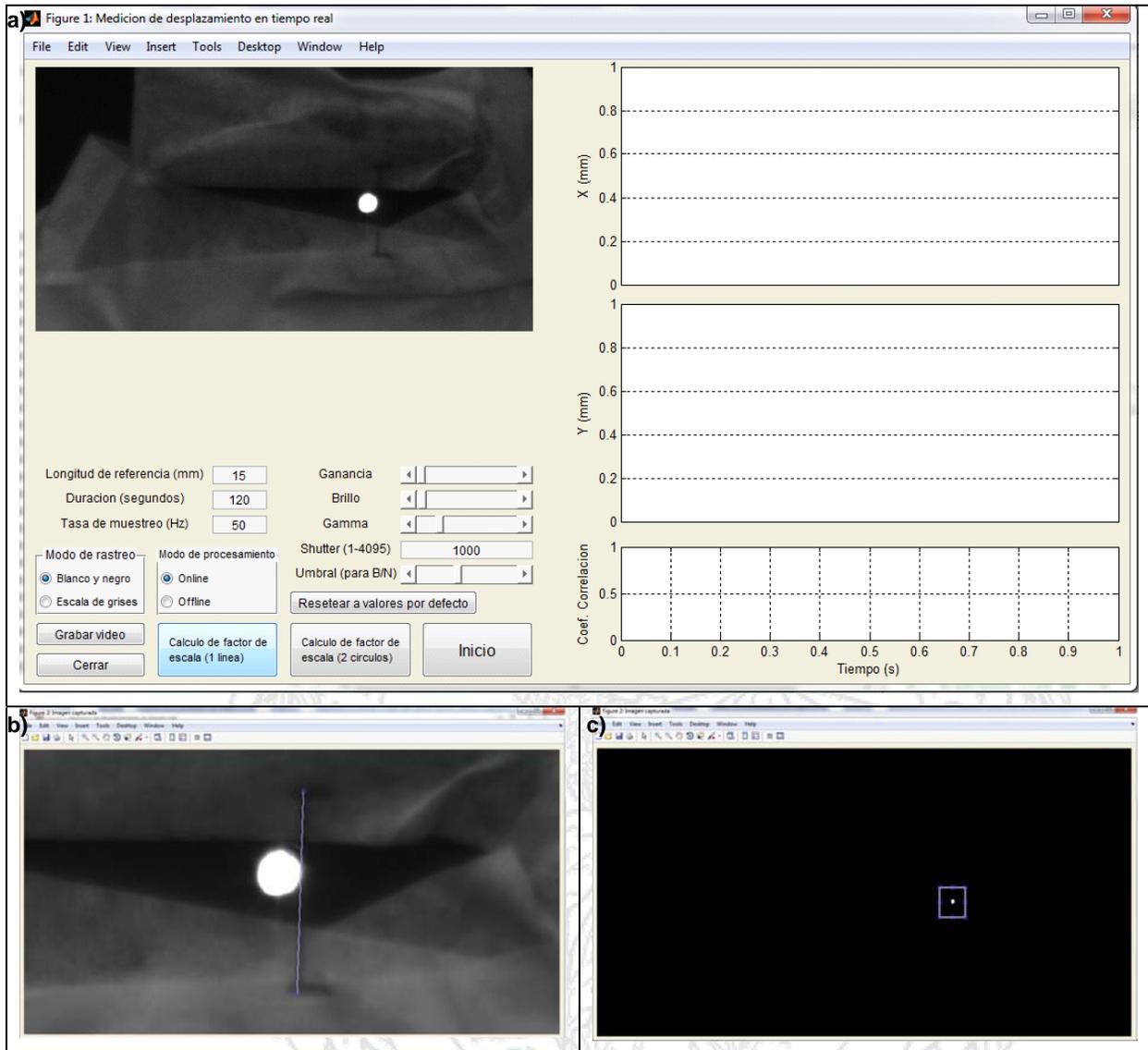
Debido a que el muro de retención junto con el brazo de soporte de aluminio no permite llegar al centro del claro, se tomó al segundo nodo a mano izquierda del nodo central como el nodo de medición, y el extensómetro láser se ubica justamente por debajo de la cuerda inferior, la que consiste en un “Tee invertido” compuesta por dos angulares. Luego, justamente sobre la placa de conexión del nodo, se ató una linterna LED para cabeza con cinta “masking tape” al elemento vertical como se muestra en la Figura 58, donde el foco de la linterna ha sido previamente cubierta con cinta aislante eléctrica de color negro, dejando un sólo orificio.



**Figura 58.** Blanco de rastreo para el sistema de medición óptica.

La longitud de referencia necesaria para realizar la medición a distancia fue marcada directamente sobre la cinta “masking”, como se puede apreciar en la Figura 59 a), donde muestra la imagen captada por la cámara del blanco; su medida fue tomada con un vernier y son unos 15 mm de longitud. En b) muestra el trazado de la longitud de referencia en el programa para obtener la escala de conversión mm/píxel, que para este caso se obtuvo un valor de 0.0492 mm/píxel, y en c) es la definición de la región de interés (ROI) para el rastreo del blanco. Debido a que el puente es sumamente rígido para las cargas peatonales dadas, y que a la distancia de aproximadamente 13 m, no es posible para el lente acercarse más debido al problema de enfoque, razón por la que la región de interés definida en c) sea tan pequeña siendo incapaz de aprovechar todos los píxeles disponibles para la medición.

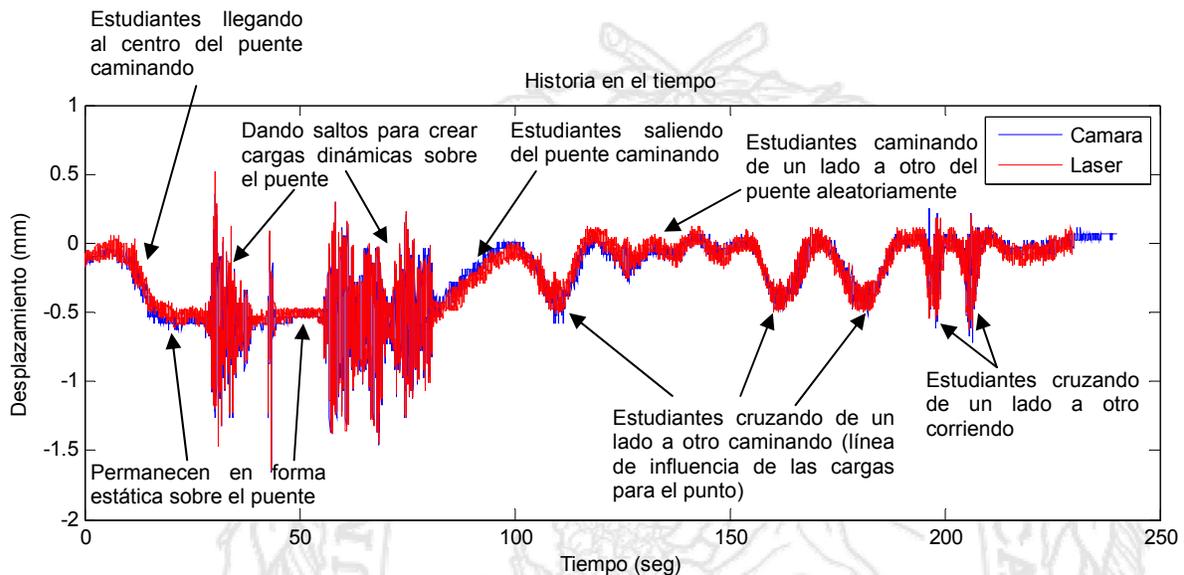
La razón por la que la luz puntual se ve mucho más difuso y extendido en la Figura 59 a) y b) que en c), se debe a que, como se ha mencionado anteriormente, se maneja un tiempo de exposición mayor para la imagen basada en la que se calcula la longitud de referencia; la luz puntual se ve mucho más “puntual” cuando se reduce el tiempo de exposición al mínimo para el rastreo en tiempo real.



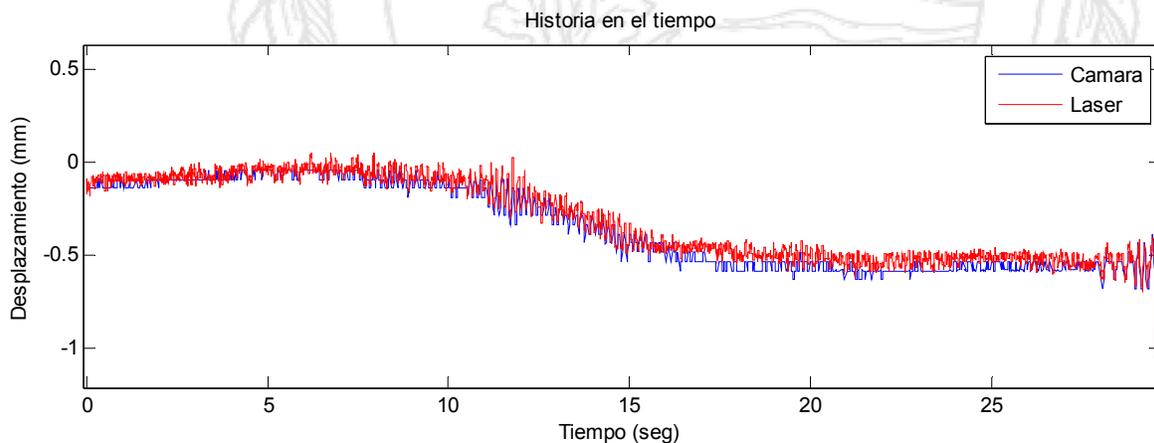
**Figura 59.** a) Visualización del blanco de rastreo a través del sistema óptico, b) trazado de la longitud de referencia, y c) definición de la región de interés para el rastreo.

Durante la ejecución de la prueba, con el afán de que el puente se deformara verticalmente en forma medible, se invitó a un grupo de aproximadamente 15 estudiantes de la escuela de ingeniería civil, para que ayudaran a “cargar” el puente con su peso: esto incluye casos donde el grupo de estudiantes pasan caminando lentamente sobre el puente, de un lado a

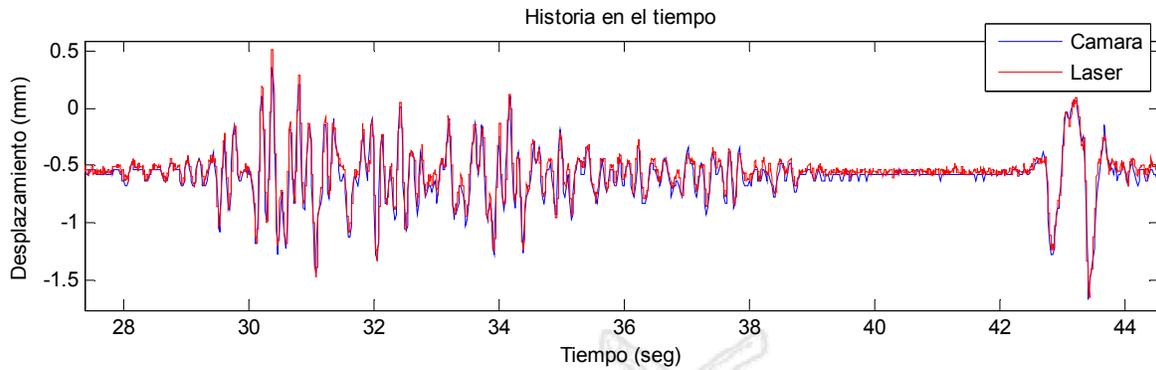
otro; luego, dando saltos sobre el puente; y también, pasar corriendo, induciendo así vibraciones de todo tipo para validar la capacidad de rastreo. Gracias a la colaboración de este grupo de estudiantes la prueba pudo ejecutarse. Los resultados de la medición se muestran en la Figura 60, donde se muestran las mediciones asociadas a diferentes acciones de carga generadas por los estudiantes. De la Figura 61 a Figura 66 se muestran acercamientos a diferentes tramos del tiempo de esta prueba realizada.



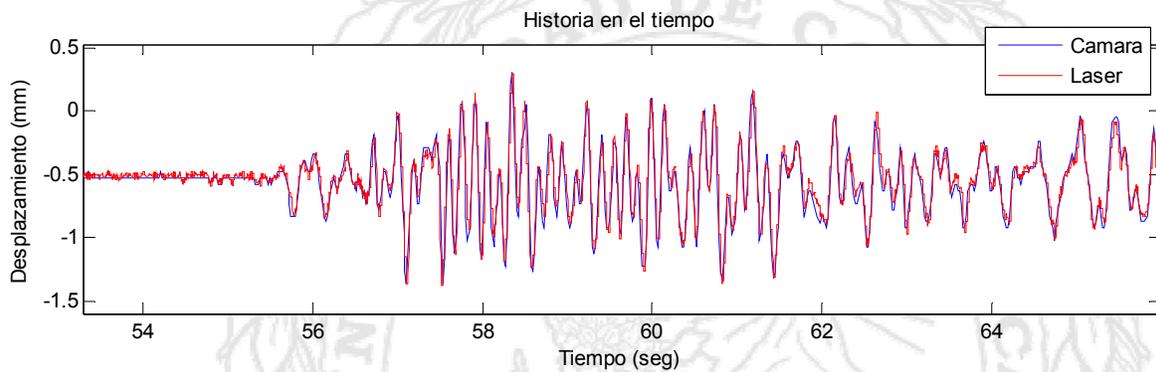
**Figura 60.** Comparación de la historia de desplazamiento vertical medido en el tiempo.



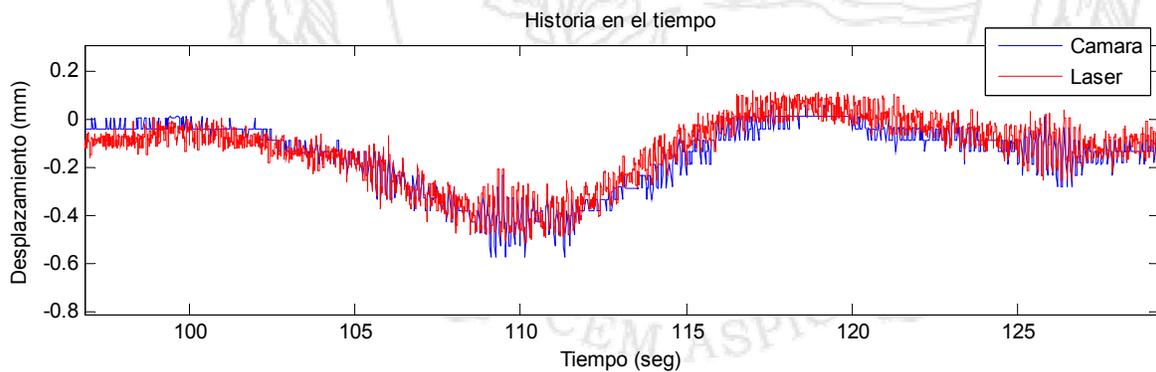
**Figura 61.** Acercamiento al tramo de la historia de desplazamiento en el tiempo cuando el grupo de estudiantes van llegando al centro del claro caminando.



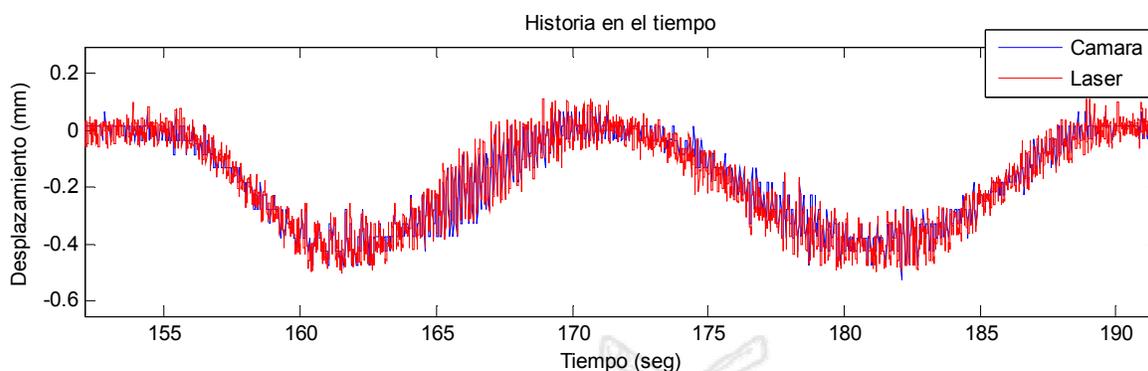
**Figura 62.** Acercamiento al tramo de la historia de desplazamiento en el tiempo cuando el grupo de estudiantes dan saltos en el centro del claro.



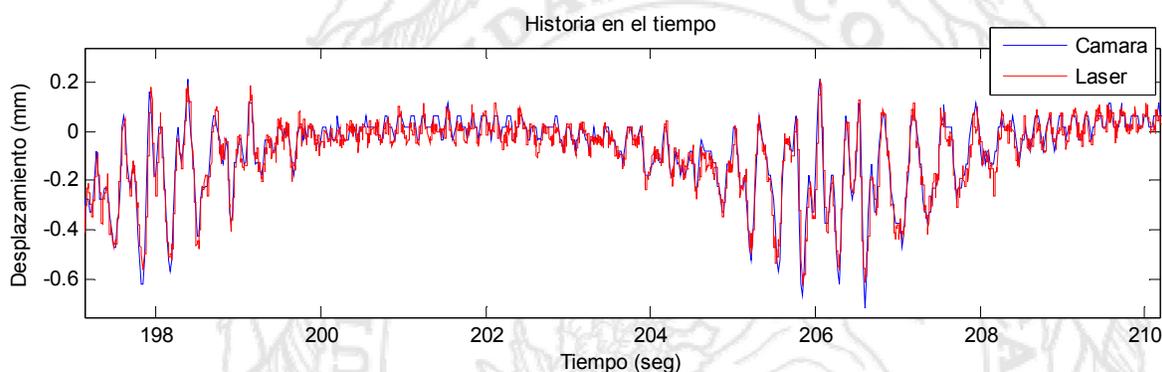
**Figura 63.** Otro acercamiento al tramo de la historia de desplazamiento en el tiempo durante los saltos en el centro del claro.



**Figura 64.** Acercamiento al tramo de la historia de desplazamiento en el tiempo cuando el grupo de estudiantes cruzan de un lado a otro caminando.



**Figura 65.** Otro acercamiento al tramo de la historia de desplazamiento en el tiempo cuando el grupo de estudiantes cruzan de un lado a otro caminando.



**Figura 66.** Acercamiento al tramo de la historia de desplazamiento en el tiempo cuando el grupo de estudiantes cruzan de un lado a otro corriendo.

De los resultados mostrados se puede concluir que el sistema de medición propuesto basado en la visión posee una capacidad casi equiparable al de un extensómetro láser, al ser posible acercarse lo suficiente al blanco de rastreo y contar con un ambiente favorable donde predomina sólo un viento de intensidad menor. Además, se puede observar que el desplazamiento máximo alcanzado durante toda la prueba es de apenas unos 1.5 mm. A pesar de que aún es insuficiente la resolución para este nivel de desplazamiento, el hecho de poder rastrear fielmente los desplazamientos sean estáticos o dinámicos durante toda la prueba, valida totalmente la aplicación de este sistema para el monitoreo de desplazamientos verticales en puentes.

## 5. APLICACIÓN DEL SISTEMA EN MONITOREO DE PUENTES

Dado que el sistema basado en la visión fue validada ampliamente con las pruebas anteriormente mencionadas, se prosigue con la aplicación del mismo ya propiamente en mediciones de laboratorio y monitoreo de puentes, evaluando así la comodidad y versatilidad del mismo para diferentes tareas de monitoreo.

### 5.1 Medición del desplazamiento pseudo-estático de un muro de mampostería en una prueba a escala natural

El sistema de medición fue implementado en laboratorio a escala natural de LanammeUCR durante la prueba de un muro de mampostería, la cual es parte de la investigación titulada “Desarrollo y Validación de Métodos de Diseño para Muros de Mampostería con Aberturas”, del ingeniero Andrés Abarca. Figura 67 muestra una fotografía de la configuración de la prueba del muro de mampostería, y la cámara se ubicaba en el “mezzanine” del laboratorio a escala natural.

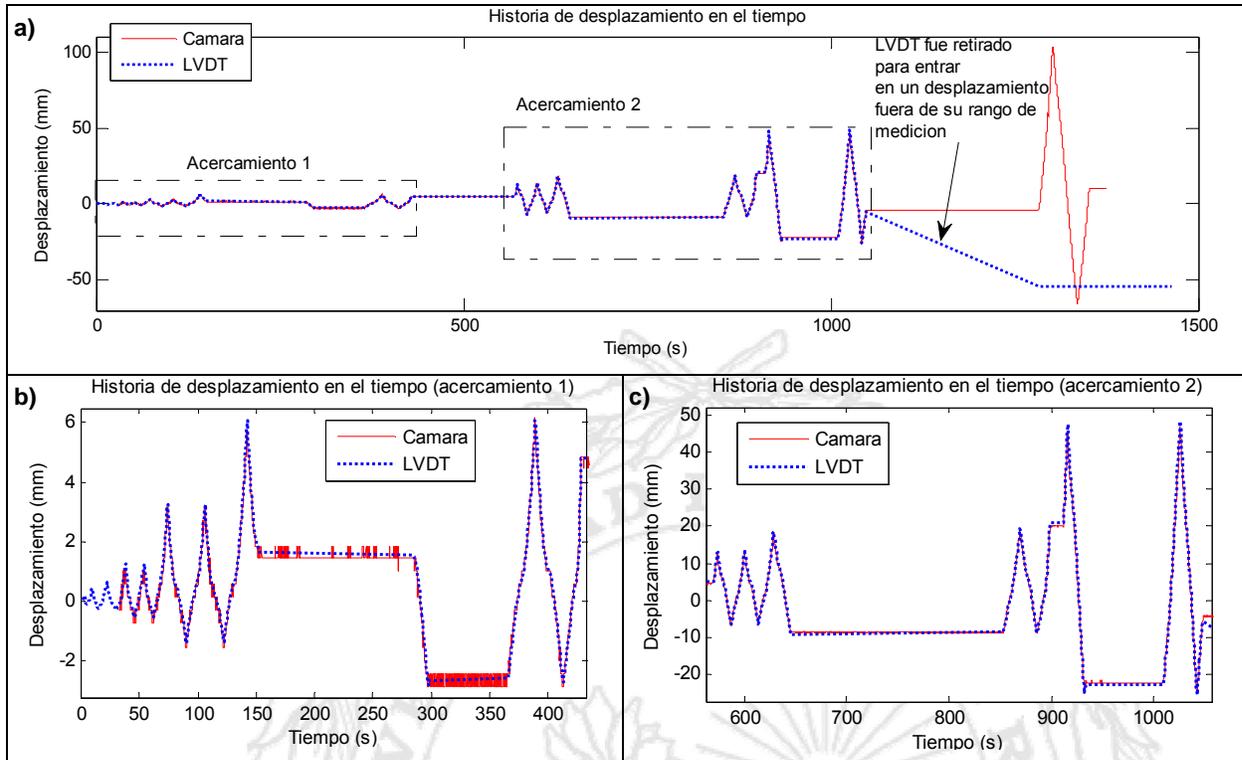


**Figura 67.** Ubicación de la cámara durante la prueba del muro de mampostería.

El muro fue instrumentado ampliamente con numerosos LVDT's (Linear Variable Displacement Transducers) y galgas extensométricas. Dado la presencia de un LVDT que mide el desplazamiento lateral del muro sometido a carga lateral cíclica, al nivel de la viga corona, se desea aprovechar la medición del mismo que sirva de comparación con la de la cámara. Así que, se dibujó un simple punto con marcador sobre la viga corona y una línea de referencia para obtener la escala de conversión mm/pixel, no es necesario un fondo oscuro con una luz LED o punto blanco, pues, se trataba de una prueba cíclica pseudo-estática donde las mediciones pueden ser estáticas (unos cuantos datos por segundo ya es suficiente), y el modo de rastreo a escala de grises puede implementarse. Para esta prueba, se adoptó una tasa de muestreo de 10 Hz.

Una limitante en esta prueba es la carencia de un lente con la longitud focal adecuada para la distancia de trabajo en laboratorio a escala natural (de unos 5 a 10 m), pues, el lente mostrado en la Figura 67 no permite acercarse lo suficiente al blanco, por lo que la resolución obtenida para la medición es sumamente baja, tratándose de sólo unos 0.5 mm/pixel. En cambio, si se utilizara el lente teleobjetivo validado anteriormente, la longitud focal no es apta para la distancia dada. Debido a esto se considera conveniente adquirir otro lente con una longitud focal adecuando para esta distancia de trabajo. El resultado de rastreo se muestra en la Figura 68.

Se puede observar en la parte final de Figura 68 a) que el LVDT fue retirado, pues, se va a dar en el muro un desplazamiento lateral mayor que excede el rango de medición de LVDT, y la cámara pudo cubrir, oportunamente, la medición faltante de LVDT para este tramo de mayor desplazamiento. En b) y c) muestran el acercamiento a diferentes partes de la historia de desplazamiento en el tiempo, donde se puede observar la exactitud que ofrece la medición basado en procesamiento de imagen digital, con el único defecto de la baja resolución debido a la ausencia de un lente con la longitud focal adecuada.



**Figura 68.** a) Comparación entre la medición de desplazamiento en el tiempo de la cámara y láser, b) acercamiento 1, y c) acercamiento 2.

## 5.2 Medición del desplazamiento dinámico de la estructura del puente sobre el río Virilla, ruta No. 1

El puente sobre el río Virilla ubicado sobre ruta nacional No. 1, conocido popularmente como “el puente de la platina” fue otro escenario de aplicación del método propuesto. Una vista en elevación del puente es mostrado en la Figura 69.

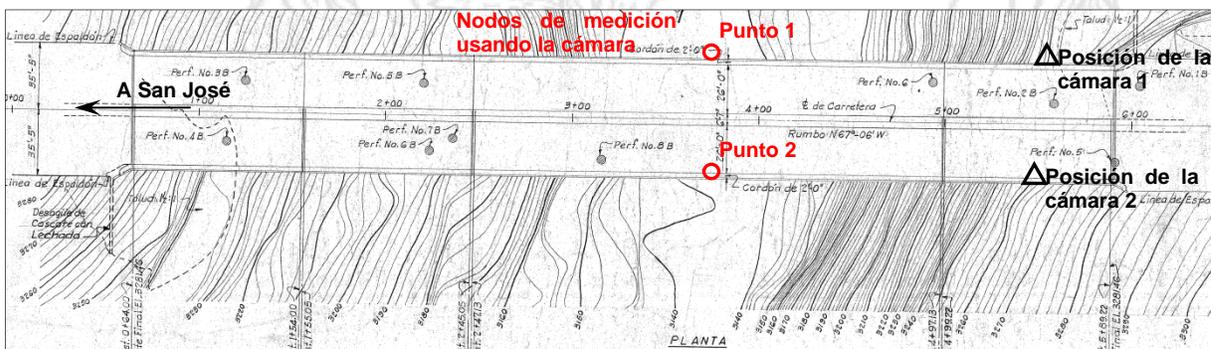
El puente ha sido sometido a estudios por diversas instituciones a lo largo de los años, entre los cuales se puede citar a algunos como el análisis de vibraciones realizado por el programa de eBridge del Instituto Tecnológico de Costa Rica (Navarro, F. y Ureña, D., 2015) [ref. 23]; la medición de vibraciones realizado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la

Universidad de Costa Rica (Schmidt, V., & Moya, A., 2011), y es importante mencionar que se había hecho varias mediciones de desplazamientos con LVDT en las vigas compuestas y tablero de los tramos 1 y 4 según se muestra en la Figura 69, a las distancias de 4.52 m y 2.36 m de los apoyos (Unidad de Auditoría Técnica, LanammeUCR, 2011) [ref. 24]. Hasta la fecha, no existe ninguna medición del desplazamiento dinámico que experimenta la estructura principal de cercha del tramo 3, debido a la imposibilidad para hallar una referencia fija donde anclar los LVDT o para emplear métodos tradicionales de medición.



**Figura 69.** Elevación del puente sobre río Virilla, ruta No. 1.

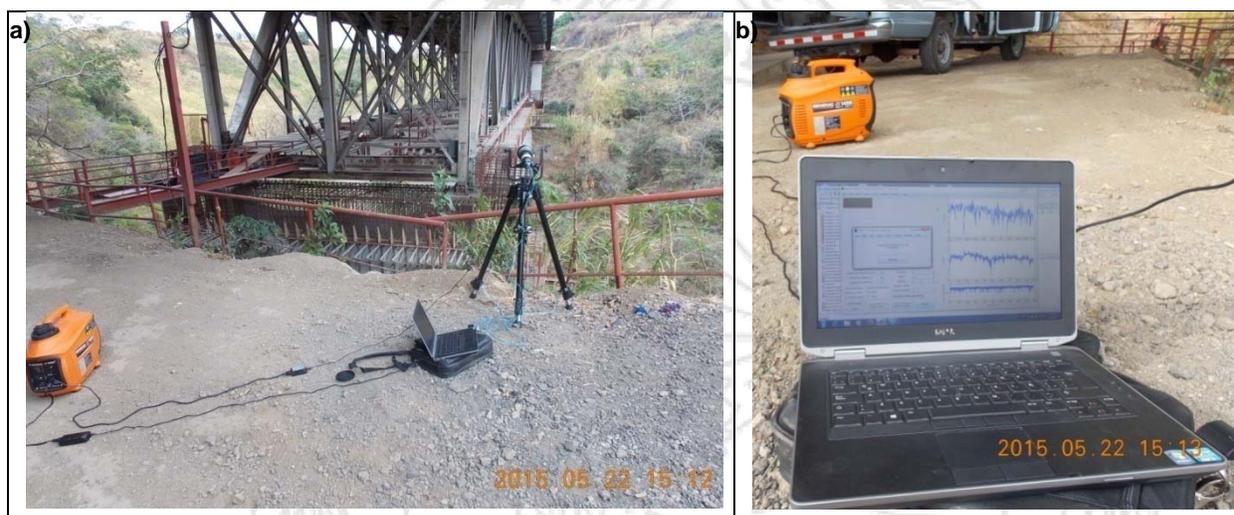
La medición del desplazamiento dinámico en el centro de la cercha del tramo 3 se realizó en dos fechas distintas el primero en 22 de Abril y el otro en 13 de Mayo, ambas en el año 2015. Los puntos de medición y la ubicación respectiva de la cámara se muestra en la Figura 70.



**Figura 70.** Ubicación de los nodos de medición en la cercha principal y la ubicación respectiva de la cámara.

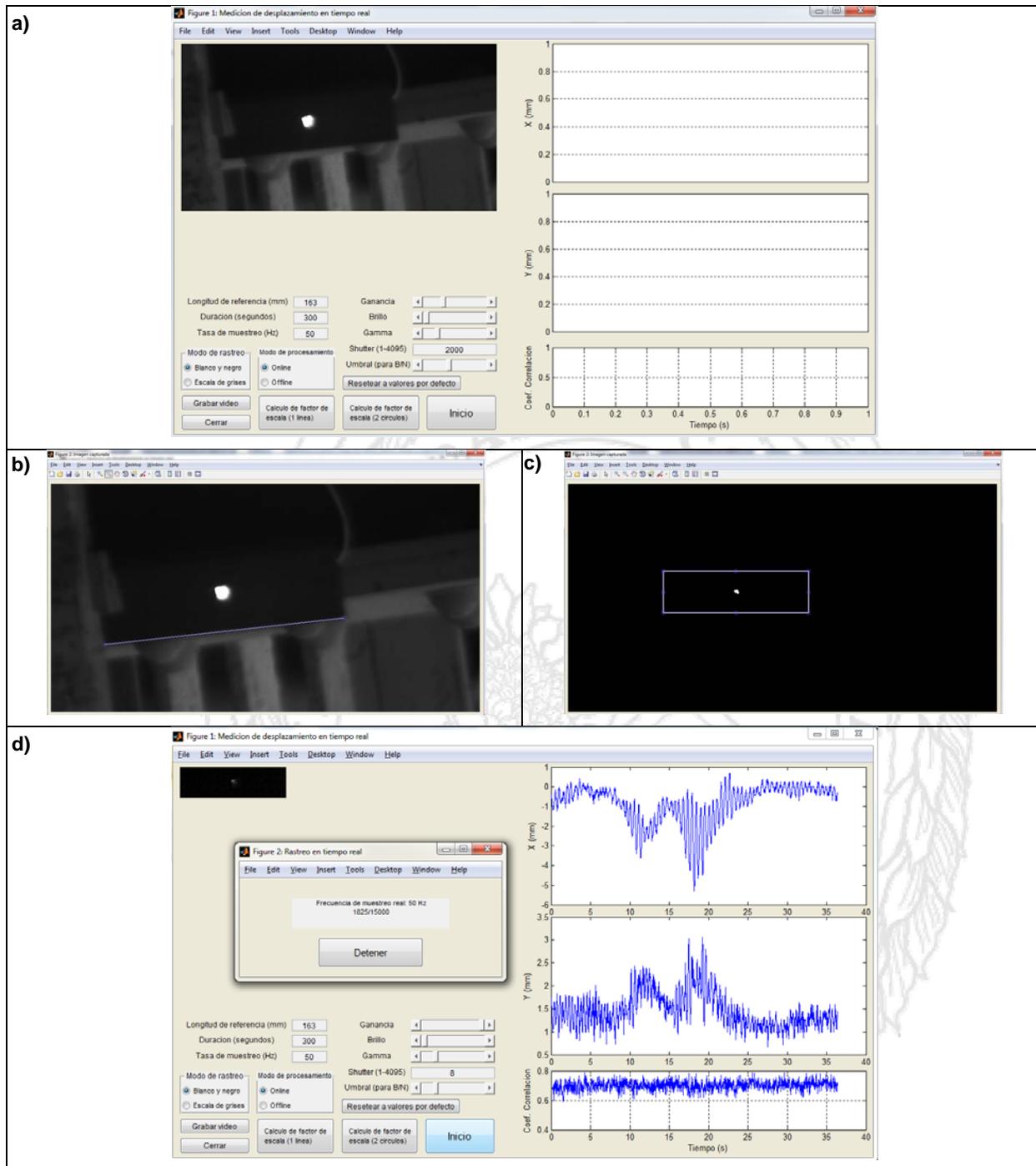
### 5.2.1 Medición en el punto 1

En la Figura 71 a) muestra una fotografía de la ubicación de la cámara, la cual se dirige hacia el blanco de medición del punto 1, señalado en la Figura 70, que no es apreciable en la fotografía debido a la distancia. En b) muestra una toma a la pantalla de la laptop donde el algoritmo de procesamiento de imágenes está rastreando el desplazamiento dinámico del punto de medición en tiempo real. En la Figura 72 y 73 muestra una serie de imágenes captadas de la pantalla de la computadora portátil donde muestra la visualización del blanco de rastreo durante diferentes etapas de la medición.



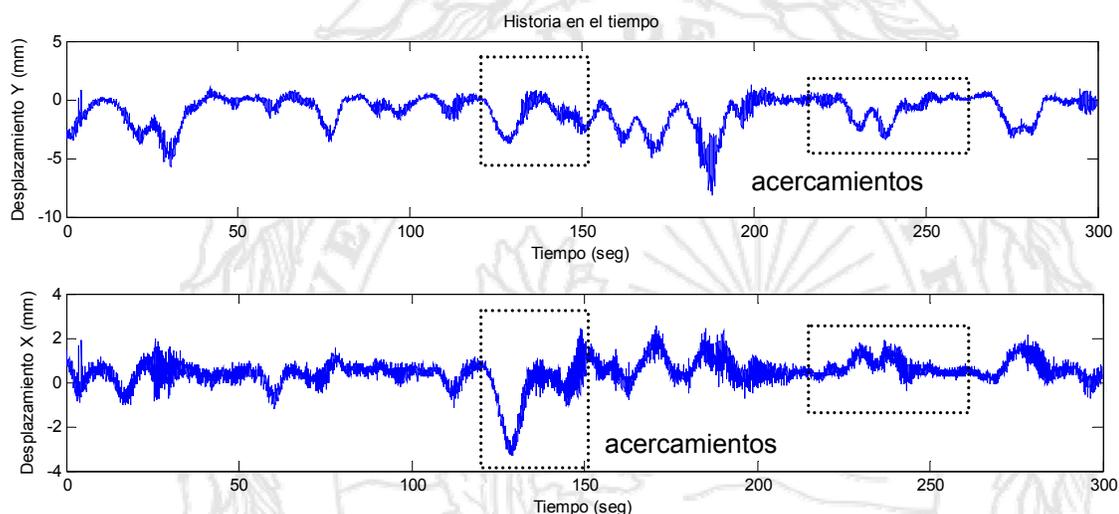
**Figura 71.** a) Ubicación de la cámara para la medición del punto 1, b) visualización del rastreo en tiempo real en la laptop.

Es importante señalar que, con el propósito de aprovechar al máximo la capacidad de la cámara, la que permite una mayor velocidad de fotogramas si la región de interés ROI es seleccionada con una menor cantidad de píxeles en dirección vertical de la imagen (mientras que en sentido horizontal la cantidad de píxeles escogidos en ROI no afecta a la velocidad de fotograma de la cámara), se rotó la cámara casi  $90^\circ$  para que el eje horizontal de la cámara concuerda con los movimientos verticales del punto de medición en el puente. Esta es la razón por la que las imágenes mostradas en la Figura 72 aparecen rotados casi en  $90^\circ$ , y la medición del desplazamiento en X es, en realidad, el desplazamiento vertical en Y del punto.



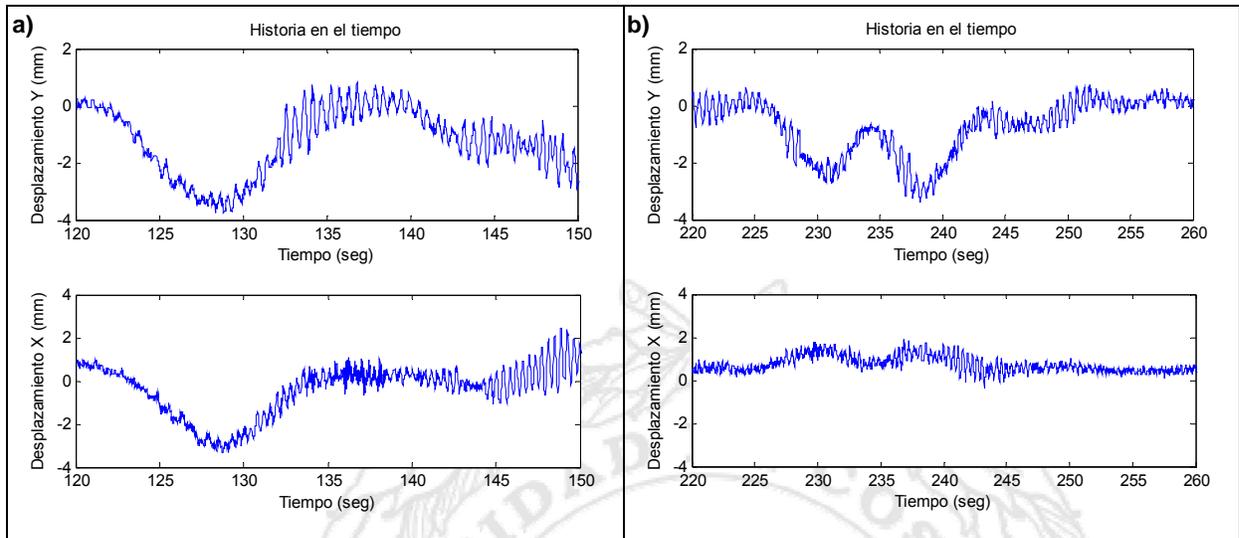
**Figura 72.** a) Como se aprecia el blanco de medición en la cámara durante la etapa de búsqueda y enfoque del blanco, b) trazado de la longitud de referencia, c) selección de la región de interés (ROI), d) rastreo en tiempo real del desplazamiento del blanco.

Según los planos, el tramo 3 tiene una longitud de 250 pies (76.2 m) y el tramo 4, 90 pies (27.4 m). La cámara está ubicada aproximadamente a la mitad del tramo 4, sumando las distancias sería unos 51.8 m entre la cámara y el blanco de rastreo. A esta distancia se pudo obtener una resolución de 0.14 mm/píxel. En la Figura 73 muestra los resultados de medición de desplazamiento tanto en dirección vertical como horizontal del punto 1, para una duración de 5 minutos y con una tasa de muestreo de 50 Hz. En la Figura 74 muestra forma manera de ejemplo el acercamiento a dos tramos durante la medición para observar en detalle las mediciones.



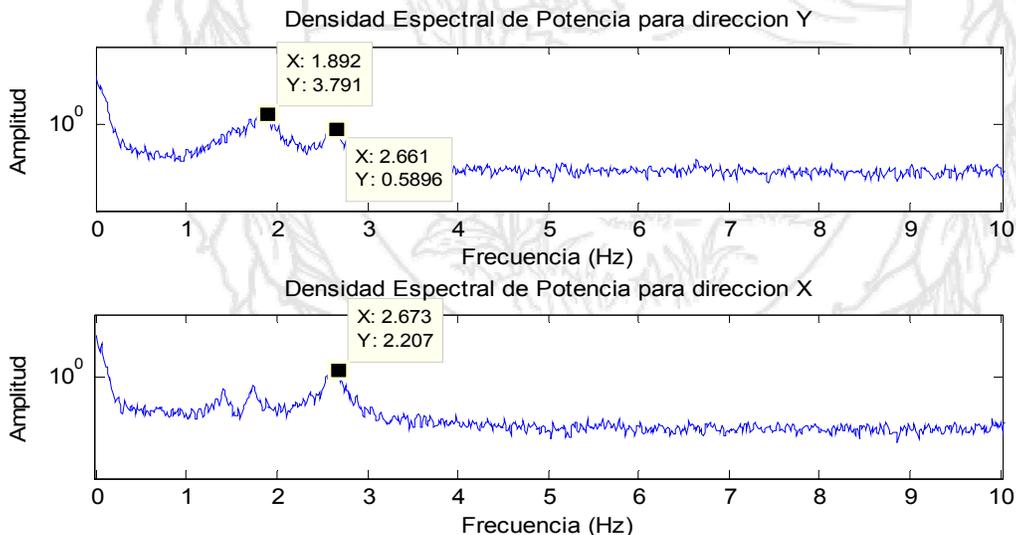
**Figura 73.** Resultado de rastreo en tiempo real del desplazamiento en X y en Y del punto 1.

De los resultados se puede observar el comportamiento típico de la deformación vertical de un puente ante las cargas vehicular, la cual está integrada por un componente estático, mostrada como la línea de influencia de la deformación vertical del punto de medición debido a una serie de cargas desplazando de un lado a otro del puente, más las vibraciones producto de la acción dinámica de las cargas en movimiento. Las mediciones en dirección “X” son un poco más ruidosas que las de dirección “Y” debido al ruido provocado por las vibraciones inducidas por el viento, tal como se ha discutido anteriormente.



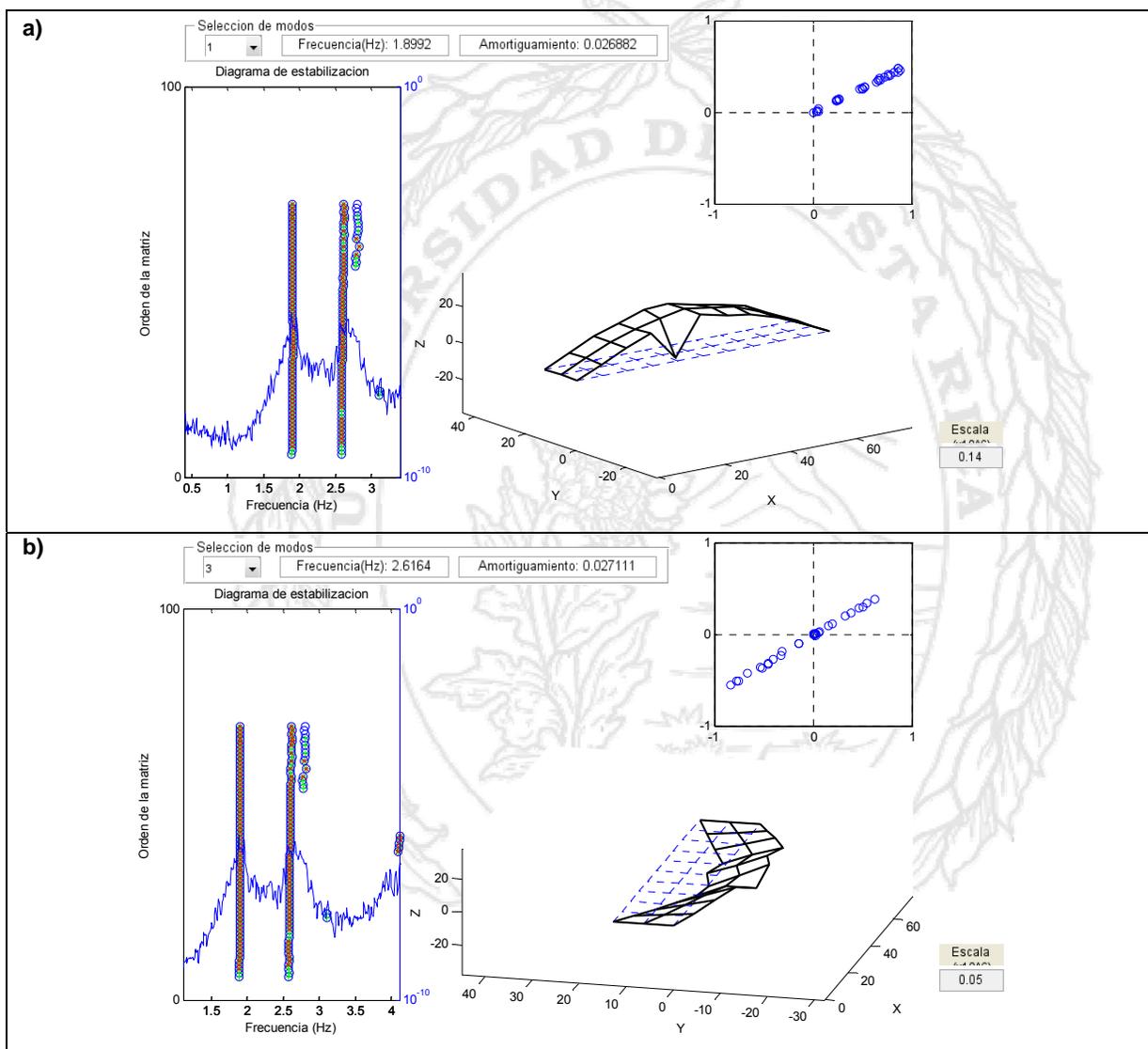
**Figura 74.** a) Acercamiento a los 120 a 150 segundos, b) acercamiento a los 220 a 260 segundos

Por otro lado, también se puede calcular las transformadas de Fourier de las mediciones en X y en Y, cuyos resultados se muestran en la Figura 75 en forma de Densidad Espectral de Potencia. Los picos tomados de los espectros corresponderían a las frecuencias de los modos fundamentales de vibración del puente.



**Figura 75.** Densidad Espectral de Potencia de las señales captadas en dirección Y y X.

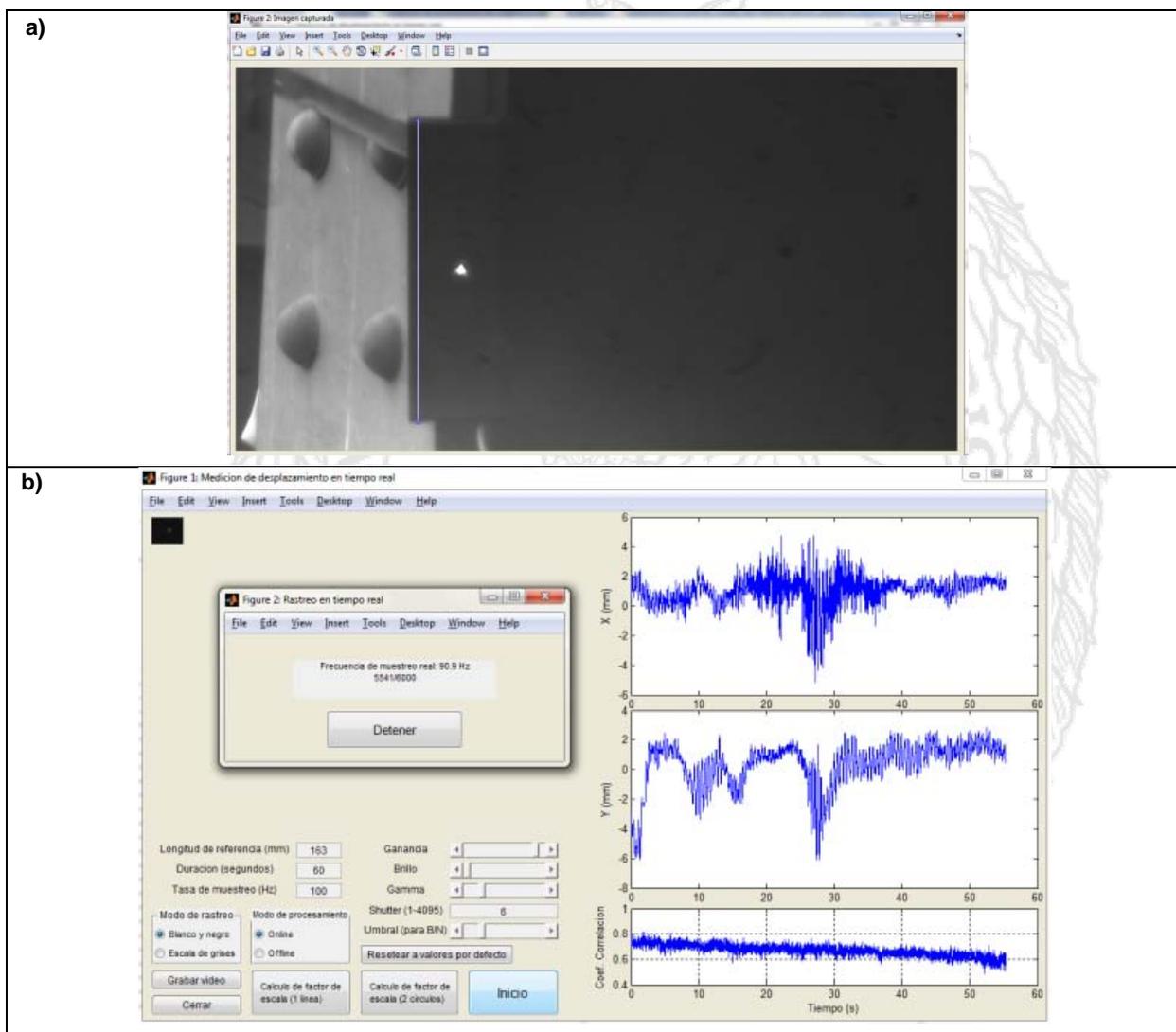
Comparando las frecuencias obtenidas de los picos con el resultado de la identificación del sistema dinámico del puente, con el método de identificación estocástico de subespacios (SSI) utilizando señales de múltiples acelerómetros instalados en los nodos inferiores de la cercha, se puede concluir que la frecuencia de 1.892 Hz corresponde al modo fundamental de flexión, y la frecuencia de 2.661 Hz corresponde al modo fundamental de torsión. La Figura 76 muestra los resultados de identificación de sistemas con SSI.



**Figura 76.** a) Modo fundamental de flexión identificado con el método SSI, y b) modo fundamental de torsión.

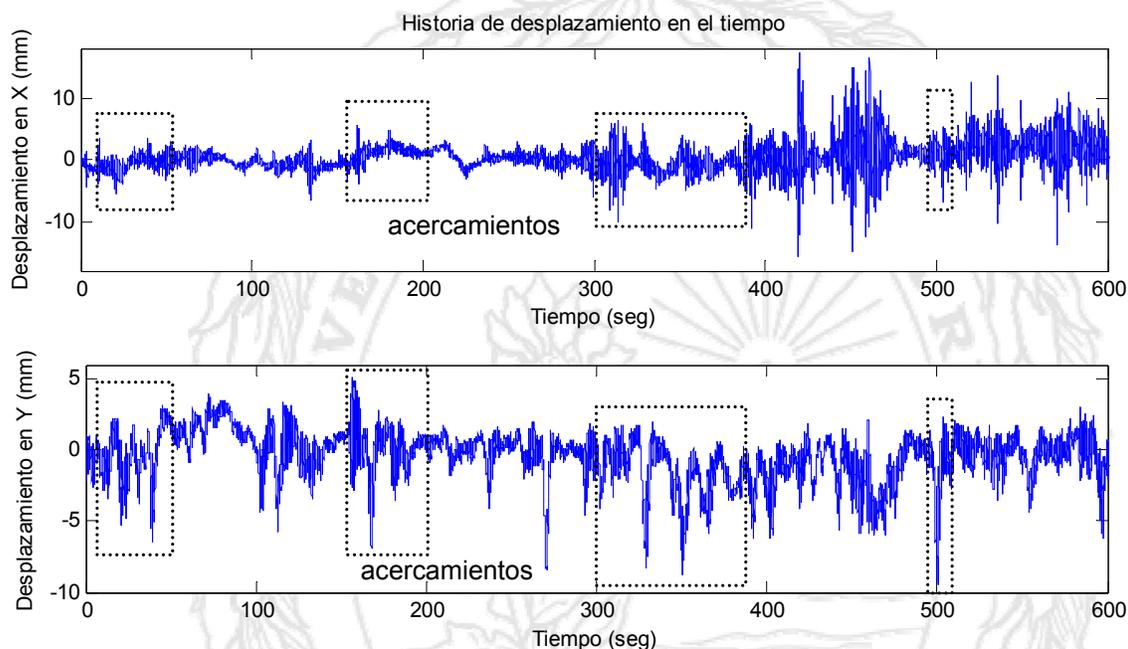
### 5.2.2 Medición en el punto 2

La medición del punto 2 se realizó colocando la cámara en el costado opuesto de donde estaba ubicado, y para la distancia dada entre el punto de medición y la cámara se obtuvo, para este caso, una resolución de 0.22 mm/píxel. En la Figura 77 muestra las imágenes donde muestra la visualización del blanco de medición, la especificación de longitud de referencia para la obtención de la escala de conversión mm/píxel y el rastreo en tiempo real.



**Figura 77.** a) Visualización del blanco de medición y el cálculo de la escala de conversión mm/píxel, b) la interfaz de usuario mostrando el rastreo en tiempo real.

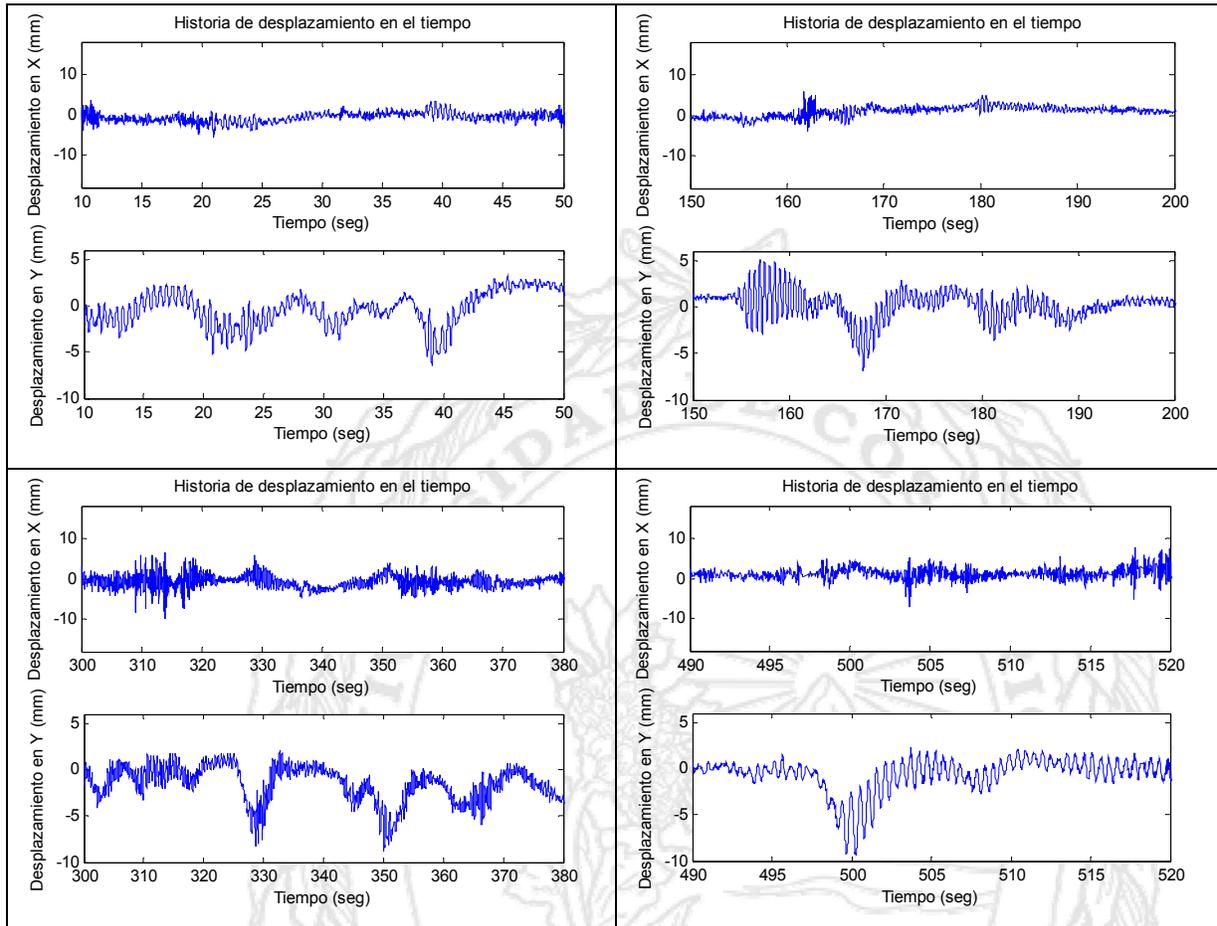
Dado que la amplitud de vibración obtenida en la medición del punto 1 no alcanza ni si quiera 1 cm, se considera innecesario rotar la cámara 90°, tal como se aprecia en la Figura 77 a), donde se puede observar que la imagen fue capturada con la cámara en su posición normal, y la región de interés de rastreo es sumamente reducida como se aprecia en la parte b) de la figura. El resultado de medición de desplazamientos verticales durante 10 minutos se muestra en la Figura 78, y la tasa de muestreo es de 100 Hz en este caso.



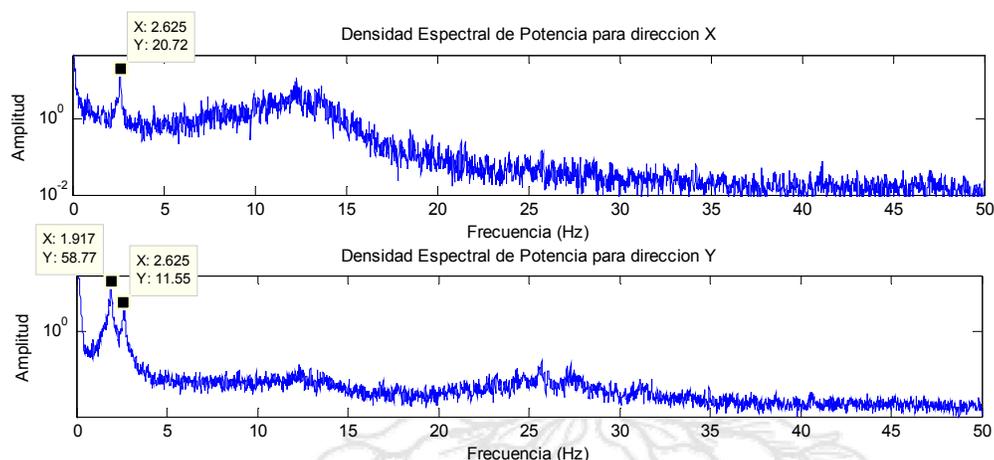
**Figura 78.** Resultado de rastreo en tiempo real del desplazamiento en X y en Y del punto 2.

Se puede observar que el desplazamiento vertical máximo registrado durante los diez minutos fue de 9.5 mm justamente a los 500 segundos. Acercamientos a algunos tramos de la historia de desplazamiento se muestra en la Figura 79, donde se puede observar claramente líneas de influencia de cargas móviles para la deformación vertical en el centro del puente, así como las vibraciones dinámicas causadas por el paso de las cargas. Por otro lado, en la Figura 80 también muestra el análisis espectral de las señales de desplazamiento,

y los picos tomados de los espectros concordaron, de nuevo, a las frecuencias de los modos fundamentales de flexión y torsión del puente.



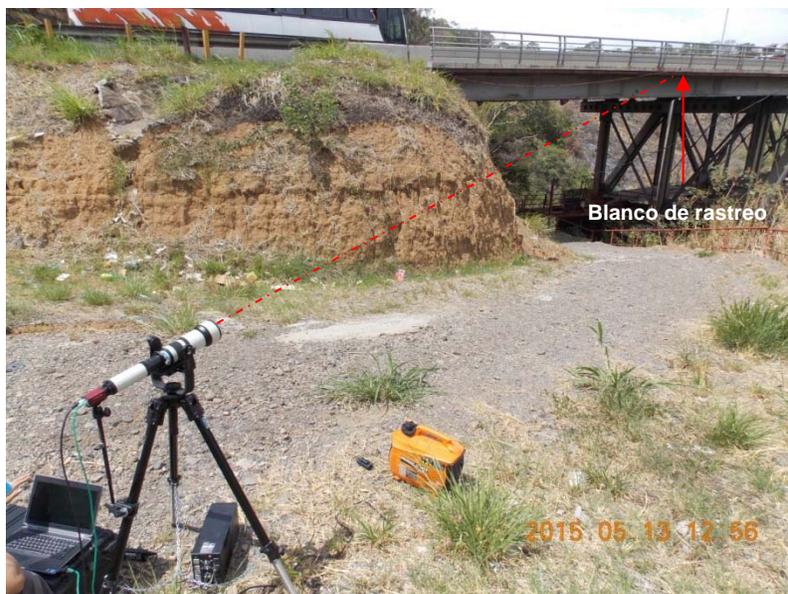
**Figura 79.** Acercamientos a diferentes lapsos de la medición.



**Figura 80.** Densidad Espectral de Potencia de las señales captadas en dirección Y y X.

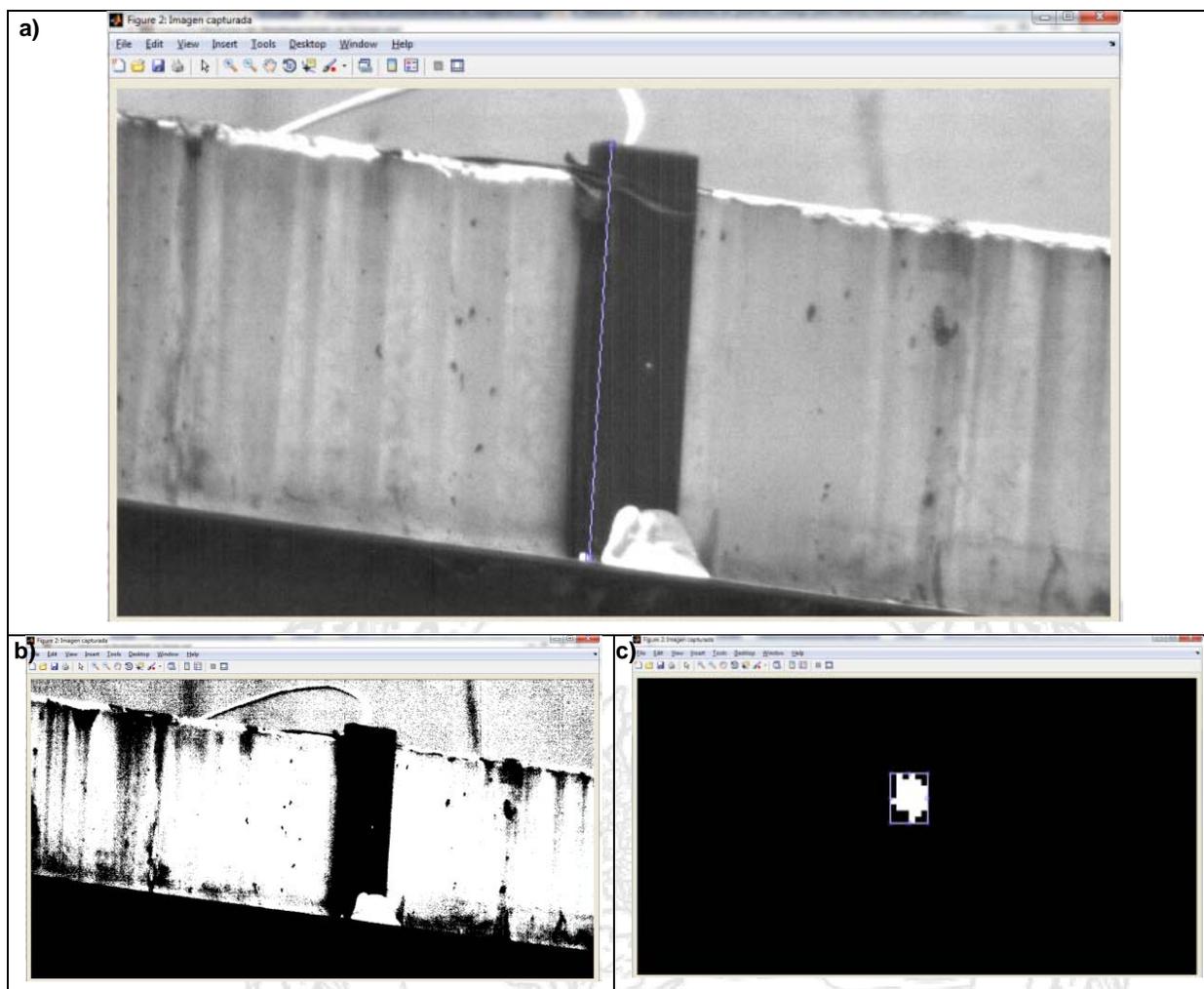
### 5.2.3 Medición de desplazamiento en el centro de claro del tramo 4

El centro del claro del tramo 4, en el costado aguas abajo del puente, es otro punto donde se registraron desplazamientos dinámicos utilizando la cámara. La cámara fue instalada en los accesos temporales al puente como se muestra en la Figura 81, y el blanco de medición fue un simple punto blanco pegado sobre la caja negra, colocada en el borde exterior de la acera. La visualización del blanco a través de la cámara se muestra en la Figura 82, donde se puede apreciar en a) un pequeño punto blanco en medio de la caja; b) es la conversión de la imagen a blanco y negro; y c) es el blanco a rastrear.



**Figura 81.** Ubicación de la cámara respecto al blanco de rastreo.

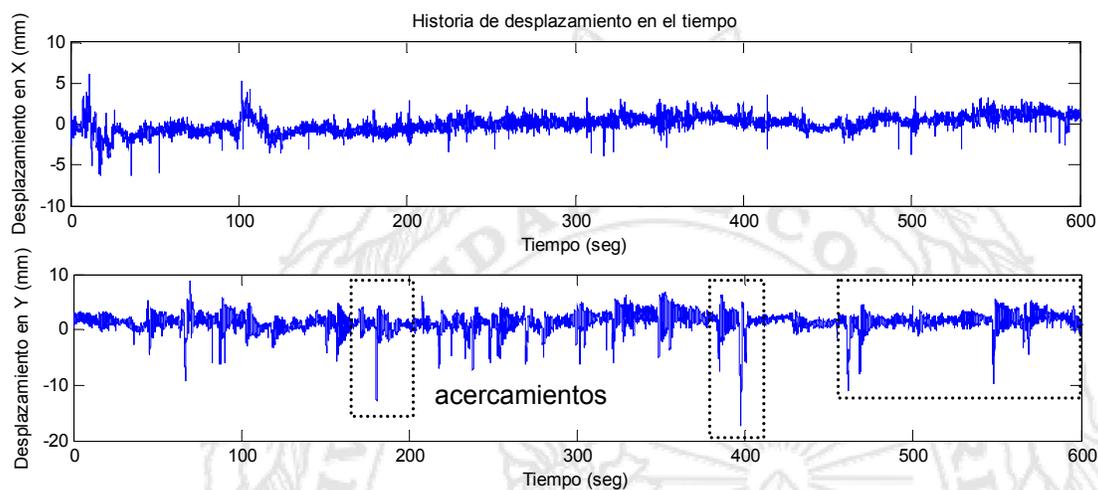
Debido a las condiciones de campo, es imposible colocar la cámara de frente al punto de medición. Al tener un importante sesgo en el plano horizontal respecto al punto de medición, y debido a que la luz LED emitida a través del orificio de la caja negra no logra ser percibida por la cámara desde el ángulo donde se encuentra posicionado. Debido a lo anterior se utilizó un pequeño trozo de cinta adhesiva blanca como el blanco en sustitución a la luz LED, el cual puede ser observado en la Figura 82 a), como un diminuto punto blanco a la mitad de la caja negra. Aunque la imagen después de convertirse a blanco y negro hay bastante zona blanca alrededor de la caja negra debido a la abundancia del rayo solar, con que en la ROI sea totalmente oscura, el algoritmo de rastreo no será afectada. Todo esto comprueba la gran versatilidad que posee el sistema para adaptarse a cualquier condición de campo y de iluminación.



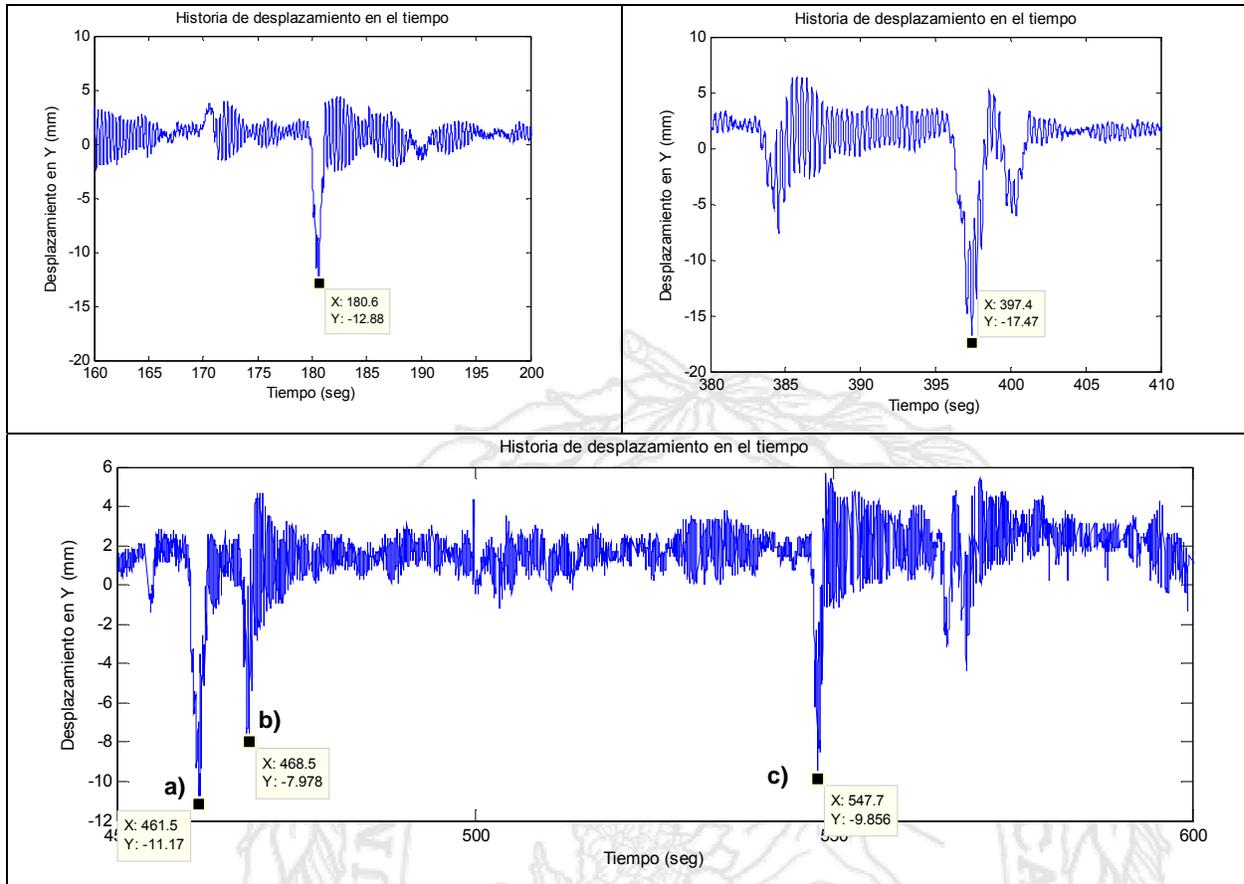
**Figura 82.** a) visualización del blanco y la caja negra por la cámara y el trazado de la longitud de referencia, b) imagen convertida en blanco y negro, c) selección del blanco de rastreo.

Los resultados de la medición de muestran en la Figura 83. La deformación vertical máxima registrada en el periodo de 10 minutos de medición fue de unos 17.47 mm, provocado por el paso de un camión de transporte de cerveza; mientras que la deformación vertical causada por el paso de buses y furgones oscilan entre los 7 mm hasta unos 12 mm. En la Figura 84 muestra el análisis espectral de las señales de desplazamiento en X y Y, donde se obtuvo dos frecuencias dominantes durante el movimiento, y corresponden probablemente a los primeros modos de flexión o torsión; y en la Figura 85 muestra acercamientos a algunas de

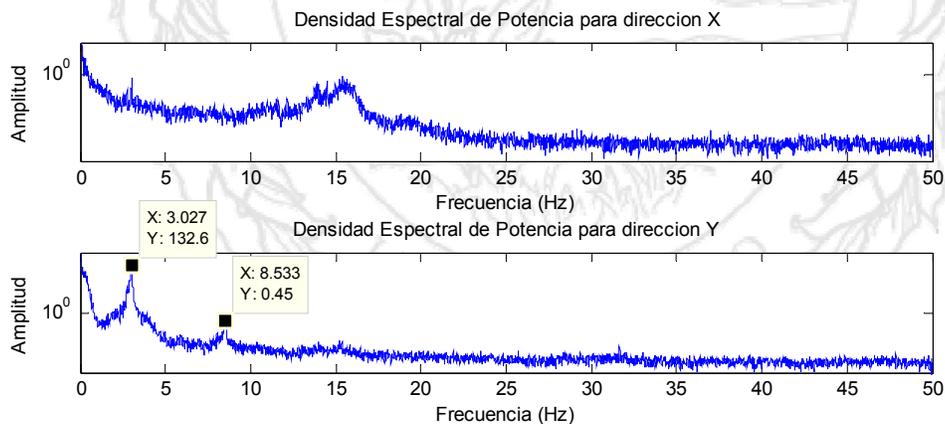
las deformaciones máximas, así como algunos tramos donde se captó la imagen del tipo de camión que se encuentra pasando en el preciso momento cuando se midió un incremento drástico en deformación vertical.



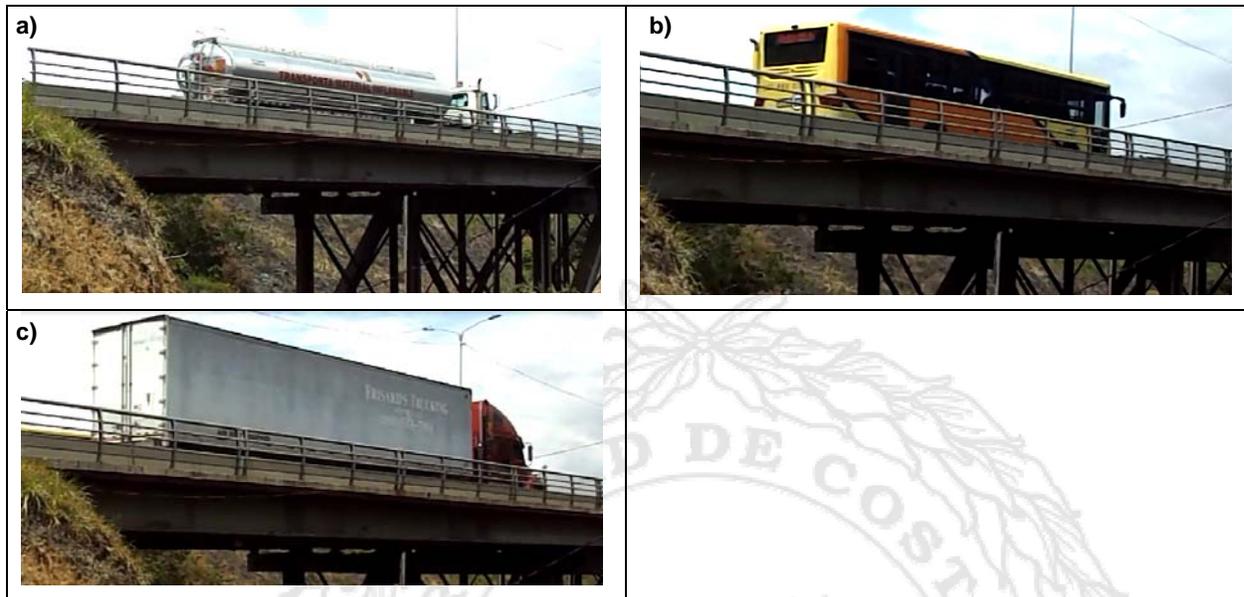
**Figura 83.** Resultado de rastreo en tiempo real del desplazamiento en X y en Y para el centro de claro del tramo 4.  
(continúa en la página siguiente)



**Figura 83 (continuación).** Acercamientos del desplazamiento en Y para el centro de claro del tramo 4.



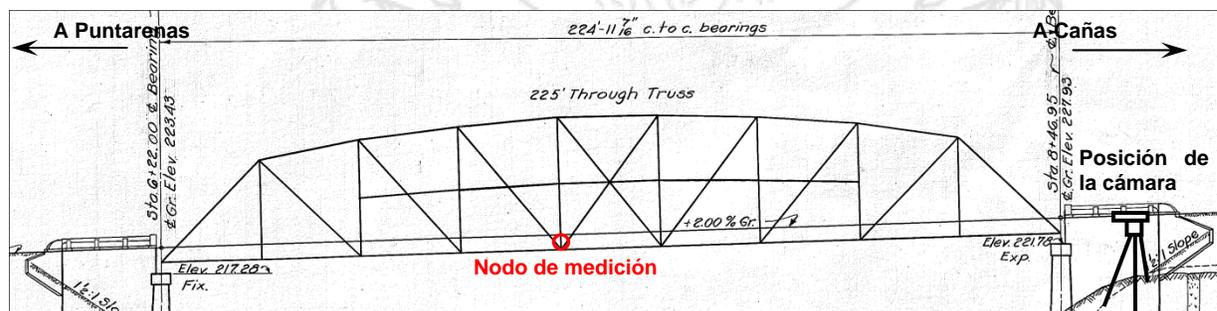
**Figura 84.** Densidad Espectral de Potencia de las señales captadas en dirección Y y X.



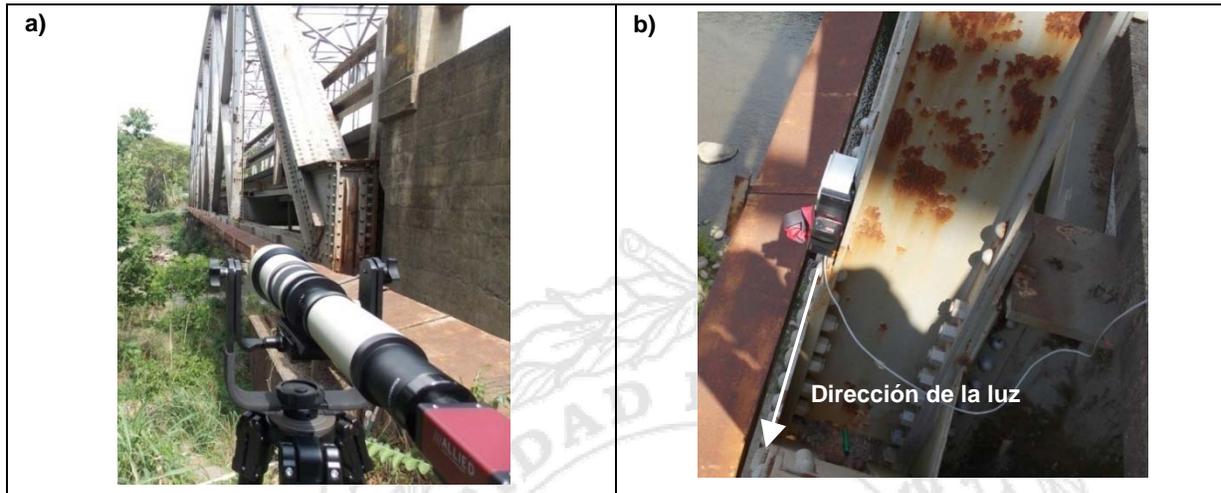
**Figura 85.** Acercamientos a diferentes lapsos de la medición, y fotografías de los tipos de carga asociados a algunas mediciones de deformación vertical.

### 5.3 Medición del desplazamiento dinámico del puente sobre el río Guacimal, ruta N° 1.

Otra aplicación del sistema se dio en el puente sobre el río Guacimal, en la ruta nacional N° 1. El puente tiene 225 pies (68.58 m) de longitud y consta de 9 paneles de 7.62 m como se muestra en la Figura 86. La cámara se ubica a un costado del puente por el relleno de aproximación del puente, tal como se muestra en la Figura 87 a), y el blanco de medición se colocó en el nodo izquierdo inferior del quinto panel, adherido a la cuerda inferior con un imán, y con la luz LED dirigido hacia la cámara, como se aprecia en la Figura 87 b).

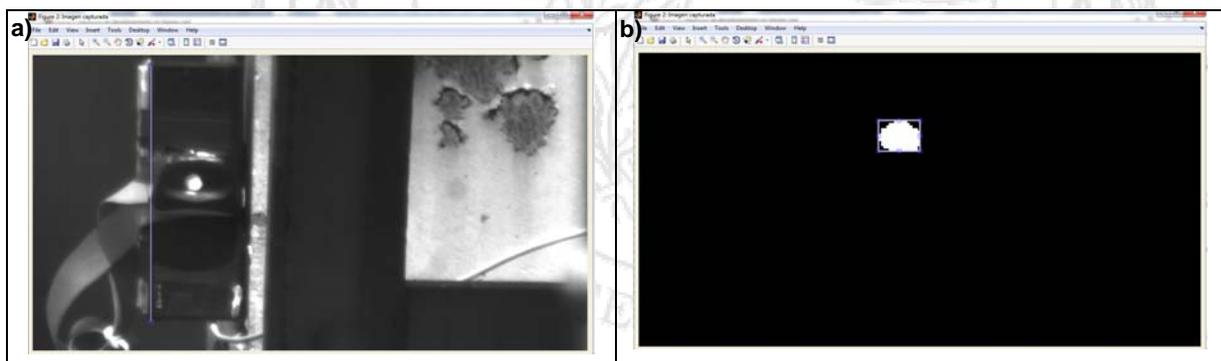


**Figura 86.** Vista en elevación del puente sobre río Guacimal y la ubicación de la cámara.

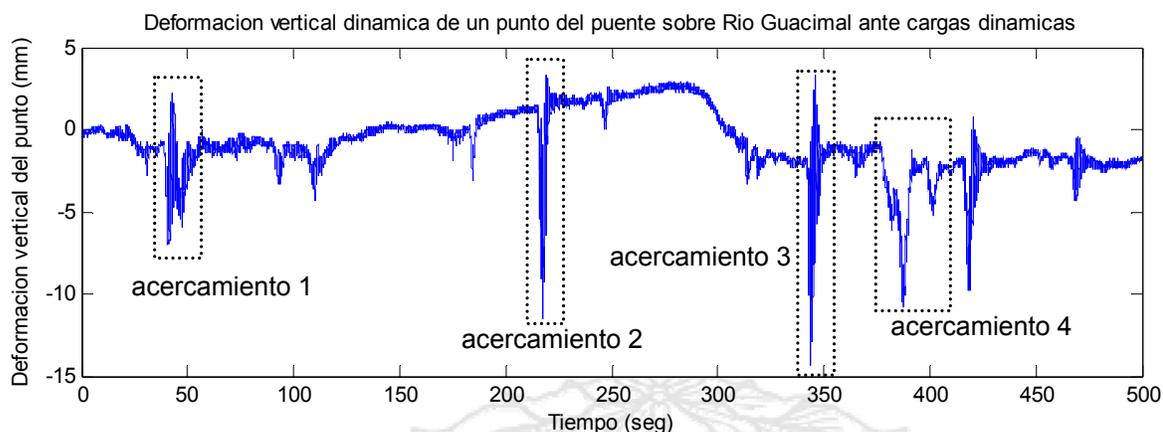


**Figura 87.** a) Ubicación de la cámara a un costado del relleno de aproximación del puente, b) fuente de luz LED adherido con imán al elemento vertical con dirección hacia la cámara.

El blanco de medición se encuentra a unos 40 m de distancia respecto a la cámara. La visualización del blanco a través de la cámara se observa en la Figura 88 a), y en b) se muestra la selección el blanco de rastreo. La escala de conversión mm/píxel obtenido para esta distancia es de 0.17 mm/píxel, y se muestreó a una tasa de 100 Hz. El resultado de medición se muestra en la Figura 89, para una duración de 500 segundos.

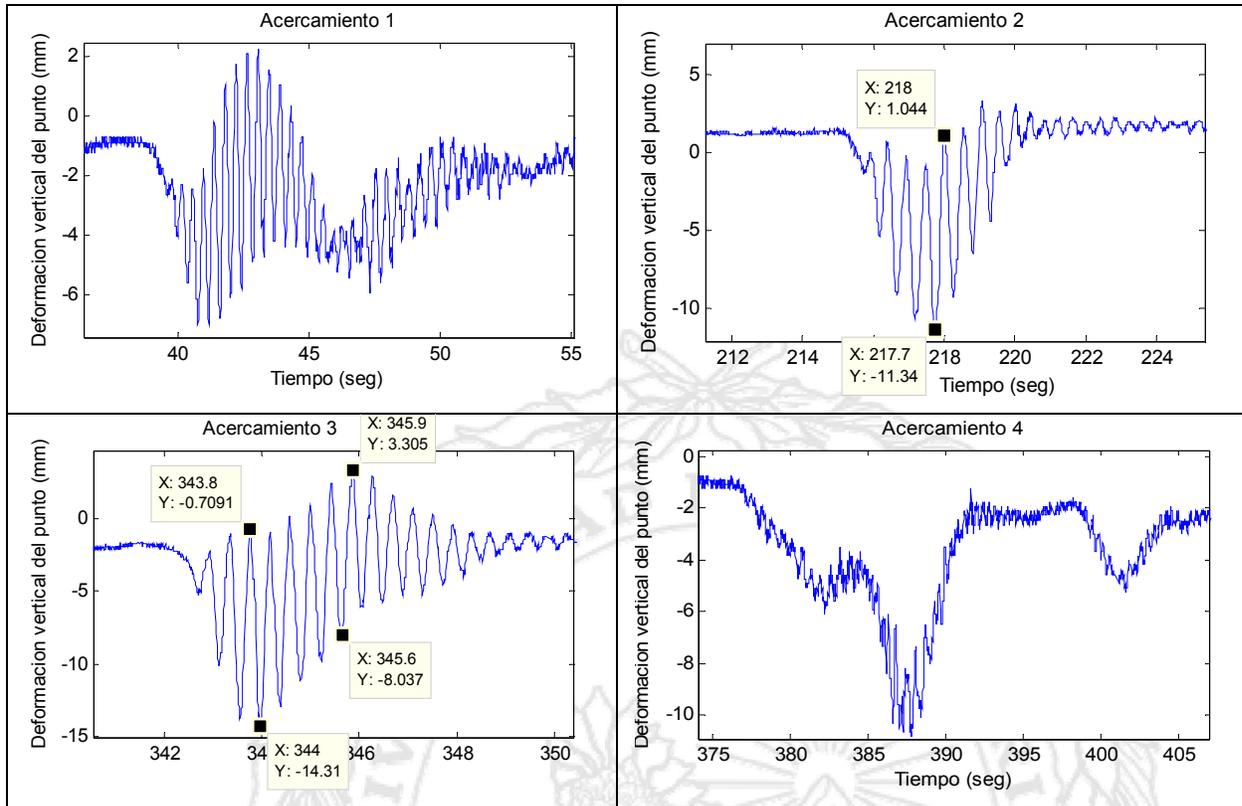


**Figura 88.** a) visualización del blanco y la caja negra a través de la cámara y b) la selección del blanco de rastreo.

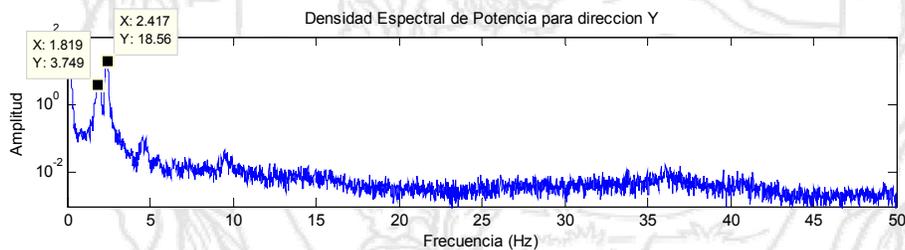


**Figura 89.** Resultado de rastreo en tiempo real del desplazamiento vertical del nodo.

Es interesante observar en la Figura 89 que el puente no tiene un nivel cero estable, de lo contrario fluctúa en el tiempo y con las cargas. Luego, de los acercamientos mostrados en la Figura 90, se puede observar las amplificaciones dinámicas en la deformación vertical que sufre el puente ante el paso de camiones. Las amplificaciones dinámicas son de tal magnitud que en el puente se registraron desplazamientos verticales positivos y una amplitud de oscilación pico-a-pico aproximadamente entre 11 mm y 13 mm. Estas oscilaciones dinámicas causan una gran incomodidad para los peatones quienes transitan de un lado a otro a través del puente. Por último, se puede observar en la densidad espectral de potencia mostrada en la Figura 91 dos picos indicando los modos fundamentales de vibración del puente.



**Figura 90.** Acercamientos a diferentes lapsos de la medición.



**Figura 91.** Densidad Espectral de Potencia de las señales captadas en sentido vertical.

#### **5.4 Prueba de carga estática efectuada en el puente sobre el río Seco, ruta N°1.**

Una de las aplicaciones esenciales de la medición de desplazamiento (o deformación) vertical en puentes se da en la llamada “prueba de carga estática”, la cual consiste en colocar cargas de magnitudes conocidas sobre una serie de posiciones en el puente, y medir la deformación vertical de algunos puntos del puente ante la acción estática de las cargas. Esta prueba es esencial para conocer la capacidad de carga real de un puente; el dato de deformación versus carga aplicada permite calibrar el modelo estructural del puente y de ello, evaluar del estado de puente y hacer predicciones en cuanto a su capacidad según las recomendaciones del “Manual para la Evaluación de Puentes” (“The Manual For Bridge Evaluation”, AASHTO, 2011) [ref. 2].

La prueba de carga estática se realizó en el día 26 de Julio del 2015, iniciando en la tarde del día anterior los preparativos de limpieza en los elementos donde se adherirán galgas extensométricas reutilizables. Desde las 5:00 a.m. del mismo día de la prueba se inició el pegado de las galgas así como la instalación de los equipos de adquisición de datos. En especial, el presente método de medición de deformación vertical del puente basado en procesamiento de imágenes, no requiere de trabajos previos, en alrededor de unos 20 minutos es posible completar la instalación del equipo de medición así como el enfoque al blanco, lo cual permite ahorrar grandemente los trabajos requeridos para la prueba de carga.

Según el capítulo 10.2 del informe presentado por JICA (JICA, 2007) [ref. 1], donde se expuso el cronograma de los trabajos realizados para efectuar prueba de carga en los puentes sobre el río Chirripó, de la ruta N°4, se puede observar que se necesitó el trabajo de una tarde para la revisión de los equipos de medición de deflexión, y otro día entero para el anclaje de la referencia para la medición de deflexión. Además, no es posible medir la deflexión exactamente en el centro del claro (donde se da la mayor deflexión) debido a las aguas en el cauce. El desarrollo y la validación de esta metodología de medición basado en la visión permitió simplificar en gran medida el trabajo necesario para efectuar pruebas de

carga, también hizo posible la medición de deformación vertical en cualquier punto del puente.

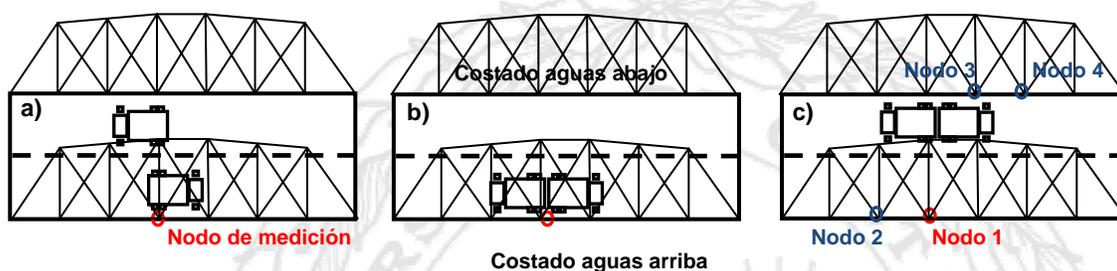


**Figura 92.** a) Ubicación de la cámara para la medición de nodos costado aguas arriba, b) medición de nodos costados aguas abajo.

El puente sobre río Seco, ubicado en el cantón Miramar de la provincia de Puntarenas, es un puente metálico tipo cercha, tiene una longitud total de 39.2 m y está compuesto por 7 paneles, cada uno con una longitud de 5.6 m. Tal como se muestra en la Figura 92 y similar al caso de río Guacimal, la cámara se ubica sobre los costados de relleno de aproximación para la medición.

La prueba de carga duró 2 horas: desde 6:00 a.m. hasta 8:00 a.m., y en total se midió la deflexión en 4 nodos (2 nodos en cada cercha) y 3 configuraciones de carga para cada nodo, además de 2 pruebas con una vagoneta pasando a 5 km/h y luego a más de 50 km/h, una por cada carril. La cámara estuvo lista previo al inicio de la prueba de carga para la medición de los 2 nodos aguas arriba (Figura 92 a); una vez completado la medición de este costado, la cámara fue trasladada a la esquina en diagonal del costado opuesto para la medición de los otros 2 nodos faltantes (Figura 92 b), y se duró unos 25 minutos para la traslación y el enfocar de nuevo la cámara al punto de medición.

Se dispone para la prueba de carga dos vagonetas de  $8 \text{ m}^3$ , pesando aproximadamente 36 Toneladas cada vagoneta. Las tres configuraciones de carga se refieren a los tres tipos de disposición de las vagonetas sobre el puente de forma que se produzca máxima deflexión por flexión, por torsión en sentido positivo y negativo, tal como se ilustra en la Figura 93. Una fotografía de la ubicación de las vagonetas para producir máxima deformación vertical por flexión, para el último nodo de medición aguas abajo se muestra en la Figura 94.

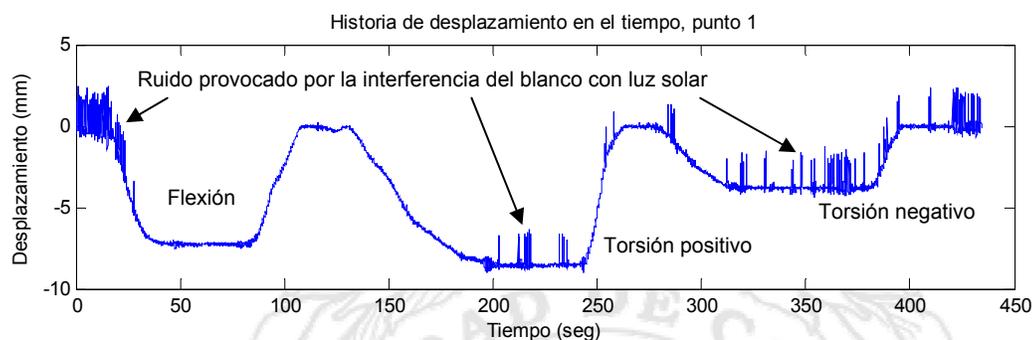


**Figura 93.** Ubicación de los camiones para producir máxima deformación vertical en el punto de medición por: a) flexión, b) torsión positiva y c) torsión negativa.

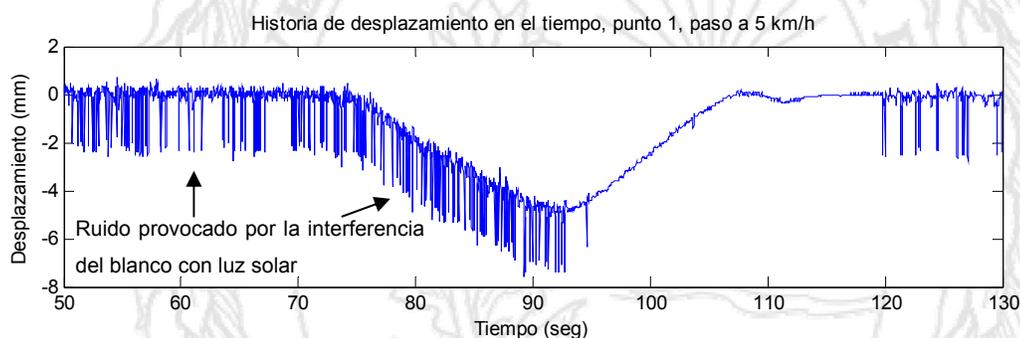


**Figura 94.** Ubicación de los camiones para producir máxima deformación vertical por flexión para el último nodo de medición (segundo nodo desde el apoyo y costado aguas abajo).

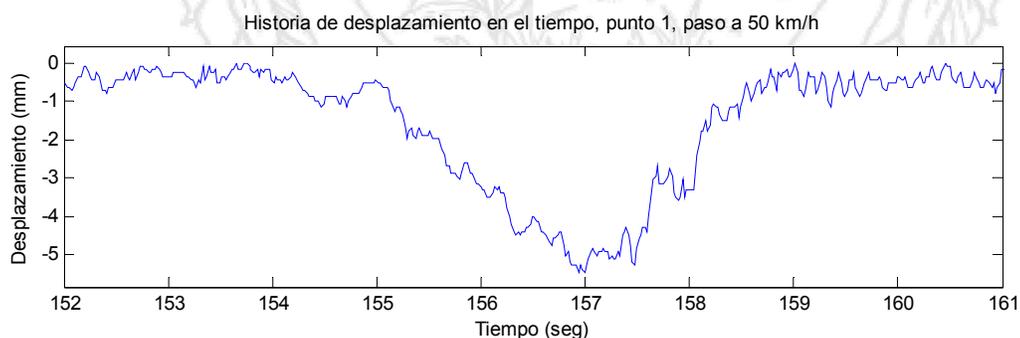
Los resultados de la medición tanto para cada nodo de medición así como para el paso de la vagoneta a dos velocidades mencionadas se muestran desde la Figura 95 hasta la Figura 102. La Tabla 6 resume las resoluciones alcanzadas para cada nodo de medición.



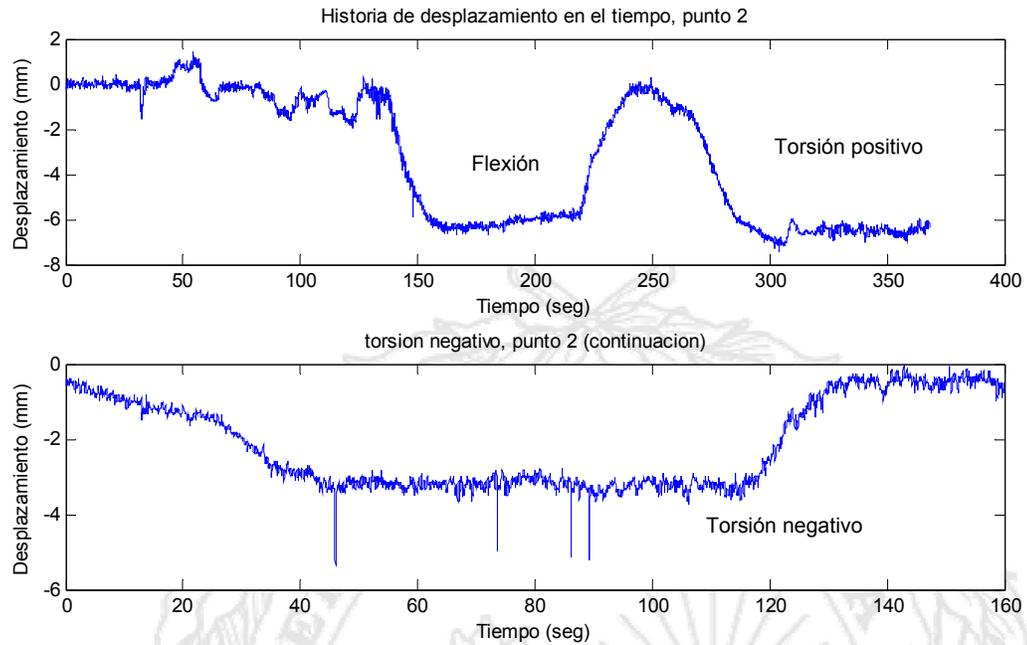
**Figura 95.** Historia de desplazamiento del punto 1 para las tres configuraciones de camiones.



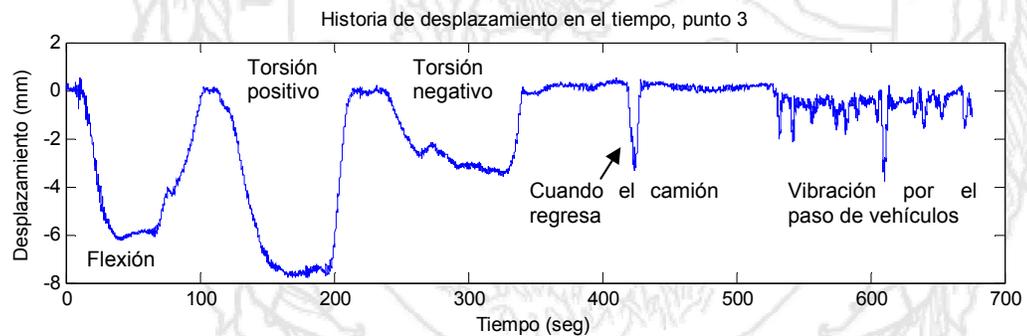
**Figura 96.** Historia de desplazamiento del punto 1 para cuando el camión pasa a 5 km/h.



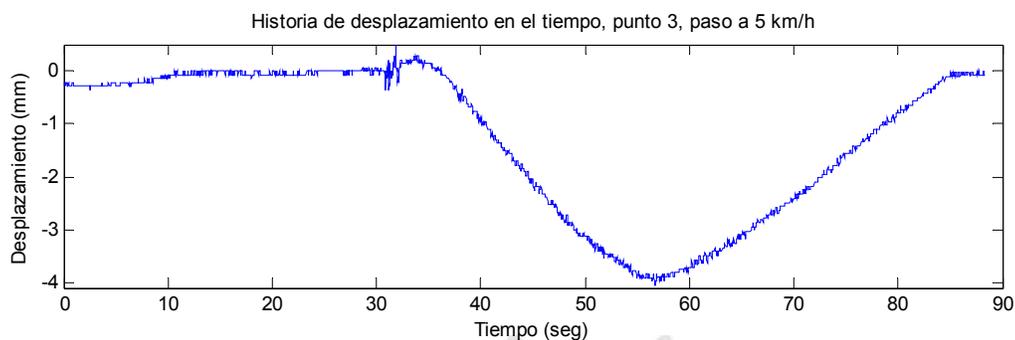
**Figura 97.** Historia de desplazamiento del punto 1 para cuando el camión pasa a 50 km/h.



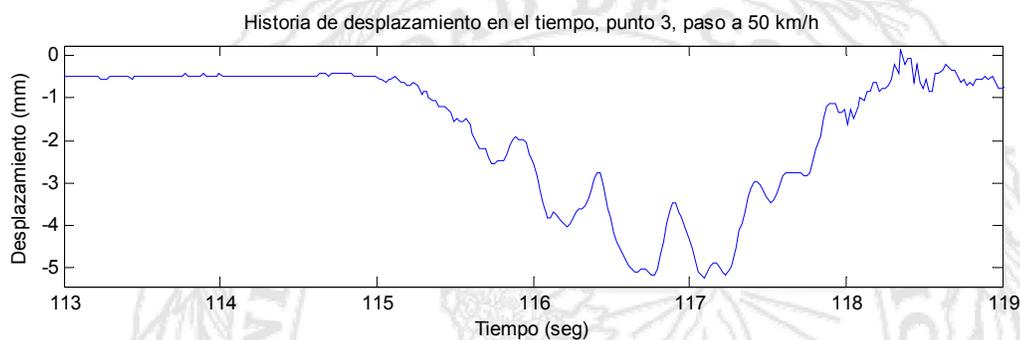
**Figura 98.** Historia de desplazamiento del punto 2 para las tres configuraciones de camiones.



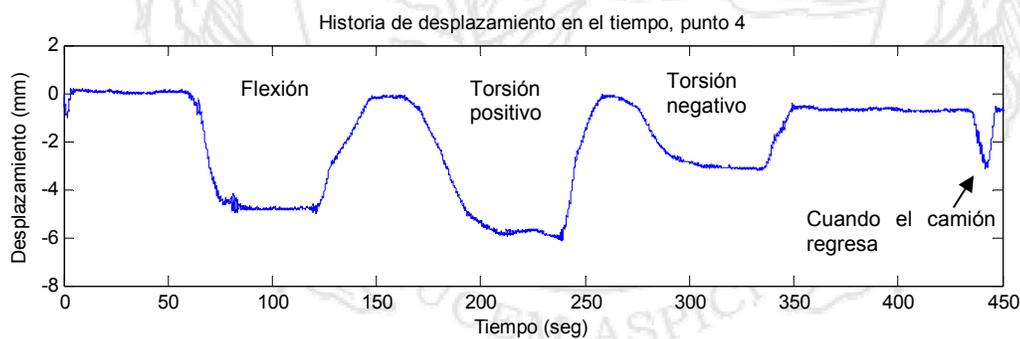
**Figura 99.** Historia de desplazamiento del punto 3 para las tres configuraciones de camiones.



**Figura 100.** Historia de desplazamiento del punto 1 para cuando el camión pasa a 5 km/h.



**Figura 101.** Historia de desplazamiento del punto 1 para cuando el camión pasa a 50 km/h.



**Figura 102.** Historia de desplazamiento del punto 4 para las tres configuraciones de camiones.

**Tabla 6.** Resolución mm/píxel alcanzada para cada nodo de medición

| Número del nodo | Resolución (mm/píxel) |
|-----------------|-----------------------|
| Nodo 1          | 0.0895                |
| Nodo 2          | 0.0645                |
| Nodo 3          | 0.0711                |
| Nodo 4          | 0.0502                |

La tasa de muestreo empleado para estas pruebas es de 50 Hz. Se puede observar en las Figuras 95 y 96, y un par de puntos de la Figura 98, la presencia de un ruido de amplitud considerable pero que es distinguible de la medición del desplazamiento real. Este ruido se debe a la interferencia de la luz LED que sale a través del orificio, con la luz del sol, que hace que el blanco visto en la cámara esté fluctuando como si fuera una llama. Esto ocurrió sólo con las mediciones del costado aguas arriba del puente, pues, este es el lado saliente del sol, mientras que las mediciones en el otro costado no se presentó este problema.

Las Figuras 95, 98, 99 y 102 muestran las mediciones debido a las diferentes configuraciones de camión sobre el puente. Se puede ver en estas figuras todo el proceso cuando los camiones ingresaron por ambos accesos del puente, cuando se iban posicionando, luego, estar unos segundos en posición para que la deformación del puente se estabilice, y finalmente salir del puente. Esto es para una configuración. luego se repitió el proceso hasta completar las tres configuraciones de carga. En las Figuras 99 y 102 también aparece la medición correspondiente cuando el camión pasa sobre el puente regresando a su posición para el próximo punto de medición.

Por otro lado, las Figuras 96 y 97, así como las Figuras 100 y 101, muestran la línea de influencia debido al paso de la carga de una vagoneta de tres ejes, medida como la deformación vertical de los puntos 1 y 3, una en forma estática y otra en forma dinámica respectivamente. Estos gráficos son de suma importancia ya que permiten conocer el efecto de amplificación dinámica de cargas móviles en el puente y obtener el factor de impacto. Además, la obtención de la línea de influencia para una carga de magnitud conocida, permite calibrar el comportamiento del puente y hacer que este último sirva de base para implementar la técnica conocida como “pesaje en movimiento en puentes” para la medición



de los pesos de los ejes que pasan a través de puentes, sin la necesidad de una estación de pesaje estático.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

- ✓ En este informe se describió en detalle el desarrollo del sistema propuesto para la medición de desplazamientos en tiempo real basado en procesamiento de imágenes, así como el diseño de los algoritmos, los interfaces y procedimientos para facilitar su implementación en los trabajos de medición en campo.
- ✓ El algoritmo de procesamiento de imágenes propuesto fue validado mediante pruebas de laboratorio comparando la medición obtenida con la de un extensómetro láser de alta precisión.
- ✓ La influencia de los sesgos en la alineación de la cámara también fue estudiado en laboratorio, y se concluye que su efecto es despreciable en la medición al enfocarse la cámara en un área de tamaño reducido y pudiendo especificar en la imagen la longitud de referencia en la dirección del movimiento.
- ✓ El sistema fue validado en campo mediante pruebas con mesa vibratoria. El soporte suspendido tipo cardán así como el brazo de soporte adicional a la cámara no provee suficiente rigidez para suprimir completamente la vibración del lente teleobjetivo en el sentido horizontal, por lo cual las mediciones en este plano pueden verse afectado por la vibración inducida por el viento; mientras que en sentido vertical, el brazo de soporte adicional sí provee suficiente rigidez al lente teleobjetivo, por lo que las mediciones de desplazamientos verticales, aún en la presencia del viento, son precisos y confiables.
- ✓ El lente teleobjetivo adquirido para el sistema es un lente comercial común de bajo costo, no tiene suficiente capacidad para enfocarse a áreas muy pequeñas (menor a 15 cm x 15 cm) a distancias más allá de los 50 m aproximadamente, por lo que lentes más poderosos y de mejor calidad es necesario para alcanzar distancias mayores.
- ✓ El sistema propuesto fue implementado exitosamente en diversas aplicaciones de campo, y se pudo obtener, con precisiones sub-milimétricas y en tiempo real, las deflexiones dinámicas en un punto de los puentes estudiados.

- ✓ Gracias al desarrollo del presente sistema se pudo obtener, por primera vez en la historia, la deflexión dinámica del centro de la cercha del puente sobre río Virilla, ruta N°1, bajo cargas operacionales de hoy día.
- ✓ El sistema propuesto también fue implementado exitosamente en la prueba de carga estática, el cual permitió ahorrar dinero, esfuerzo humano y tiempo para la ejecución de este tipo de pruebas.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- ✓ A la hora de instalar el sistema de medición (el trípode y el soporte con lente), es importante asegurar el nivel y el balance del lente teleobjetivo, para evitar la rotación en el plano horizontal causada por la longitud y el desbalance de peso del lente y como consecuencia, producir un corrimiento lento en el tiempo de la base cero de medición.
- ✓ En condiciones climáticas severas como el largo tiempo de exposición bajo el sol, se recomienda adquirir un toldo de protección para evitar el sobrecalentamiento tanto de la cámara como de la computadora portátil y permitir alargar su vida útil.
- ✓ Adquirir un telescopio astronómico de mayor capacidad de acercamiento en vez de un lente teleobjetivo, además, de menor longitud para evitar problemas de vibración, al cual se puede adaptar la cámara digital ya adquirida, para aumentar la capacidad y mejorar la resolución del sistema para la medición a distancias mayores.
- ✓ Diseñar y construir un blanco de rastreo de mayor calidad y que permita instalarse en cualquier tipo de puente y en cualquier sitio, y con la libertad de dirigir el foco de luz hacia cualquier ángulo.
- ✓ Implementar el presente sistema a monitorear las deflexiones dinámicas de los puentes de Costa Rica, datos de las cuales constituirían un insumo de gran importancia que permitirían conocer las demandas impuestas hoy día a los puentes, y el estado de desempeño de los mismos.

## REFERENCIAS

- [1] Japan International Cooperation Agency (JICA), “The study on capacity development in bridge rehabilitation planning, maintenance and management based on 29 bridges of national highway network in Costa Rica”. Final Report. (Feb. 2007) Cap. 10.2
- [2] American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO), “The Manual For Bridge Evaluation”, 2nd Ed. Washington D.C., USA, 2011.
- [3] Jjiang et al., “Study for Real-time Monitoring of Large-Span Bridge Using GPS.” Proc. ISSST 2002, "Progress in Safety Science and Technology", (Sep, 2002) p. 308~312.
- [4] Massimiliano Pieraccini, “Survey and testing through interferometric radar: applications to Cultural Heritage and public utilities.” IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires (Oct, 2007).
- [5] Takeshi Miyashita & Masatsugu Nagai, “Vibration-based Structural Health Monitoring for Bridges using Laser Doppler Vibrometers and MEMS-based Technologies.” Steel Structures 8, (2008), p. 325-331.
- [6] Sung et al., “A case study on bridge health monitoring using position-sensitive detector technology.” Structural Control and Health Monitoring, Vol. 19, Issue 2 (Mar, 2012) p. 295–308.
- [7] Unidad de Puentes. “Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de Instrumentación Inalámbrico”. LM-PI-UP-02-2013. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Febrero, 2013.

- [8] Lee et al. "Evaluation of Bridge Load Carrying Capacity Based on Dynamic Displacement Measurement Using Real-time Image Processing Techniques". *Steel Structures* 6 (2006) p. 377-385.
- [9] J. J. Lee & M. Shinozuka. "Real-Time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing Techniques". *Experimental Mechanics* (2006) 46: p. 105–114.
- [10] Santini-Bell et al. "Digital Imaging for Bridge Deflection Measurement of a Steel Girder 1 Composite Bridge". *Transportation Research Board 2011 Annual Meeting*, paper 11-1633.
- [11] Hubert Schreier, Jean-José Orteu y Michael A. Sutton. "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications." Springer (2009).
- [12] Clocksin et al., "Image processing issues in digital strain mapping." *Proc. SPIE* 4790 (Nov, 2002), *Applications of Digital Image Processing XXV*, 384.
- [13] Chu et al., "Application of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics." *Experimental Mechanics* (1985), 25(3), p.232.
- [14] Koji Mitani y Masato Matsumoto, "Innovative Bridge Assessment Methods Using Image Processing and Infrared Thermography Technology." 37th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES (Aug, 2012), Singapore.
- [15] Yamaguchi et al., "Image-Based Crack Detection for Real Concrete Surfaces." *Transactions on Electrical and Electronic Engineering* (2008), 3: 128–135.

[16] Jeffrey D. Helm, "Digital image correlation for specimens with multiple growing cracks." Proceedings of the XI<sup>th</sup> International Congress and Exposition, Society for Experimental Mechanics, (June, 2008), USA.

[17] Michel et al., "Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles." Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, No.60, (Oct/Dec, 2011) Medellín.

[18] Xiaojuan Qi, "Dynamic Structural Deflection Measurement with Range Cameras." Master Thesis, (2013), University of Calgary.

[19] Haemin Jeon, Yousuk Bang, and Hyun Myung, "Measurement of Structural Displacement Using Visually Servoded Paired Structured Light System." Proceedings of the 28th ISARC (2011), p. 189-192, Seoul, Korea.

[20] Thomas Luhmann, Heidi Hastedt, Werner Tecklenburg, "Modelling of Chromatic Aberration for High Precision Photogrammetry." IAPRS, Volume XXXVI, Part 5, Dresden, 25-27 September, 2006.

[21] JP Lewis, "Fast normalized cross-correlation." Vision interface, 10 (1), 120-123. 1995.

[22] Schmidt, V., & Moya, A. (2011). "Informe de medición de vibraciones sobre el puente del río Virilla." San Pedro, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

[23] Navarro-Henríquez, Francisco, Ureña-Muñoz, Daniel. (2015) "Mediciones y análisis de vibraciones en el puente Virilla, ruta nacional N° 1." Tecnología en Marcha, Vol. 28, N.º 2, Abril-Junio 2015.

[24] Unidad de Auditoría Técnica, LanammeUCR. (2011) "Informe de auditoría técnica al proyecto de intervención de la losa del puente sobre el río Virilla, Ruta N°1." Proyecto: LM-PI-



Laboratorio Nacional de  
LanammeUCR Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE

AT-55-11. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR).

